



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI *HIGH VOLTAGE GAIN*
DC-DC BOOST CONVERTER UNTUK APLIKASI *FUEL*
*CELL***

Irawan
NRP 2213100027

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Suwito, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HIGH VOLTAGE
GAIN DC-DC BOOST CONVERTER FOR FUEL CELL
APPLICATION**

Irawan
NRP 2213100027

Advisors
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Suwito, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan penelitian saya dengan judul "**Desain dan Implementasi High Voltage Gain DC-DC Boost Converter Untuk Aplikasi Fuel Cell**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017



Irawan

NRP. 2213100027

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI HIGH VOLTAGE GAIN DC-DC
BOOST CONVERTER UNTUK APLIKASI FUEL CELL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Teknik Sistem Tenaga

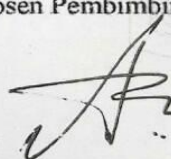
Departemen Teknik Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198006032006041003

Suwito, ST., MT.

NIP. 198101052005011004



ABSTRAK

Saat ini sudah banyak dilakukan penelitian mengenai potensi energi baru terbarukan terutama penelitian mengenai potensi *photovoltaic* dan *fuel cell*. Namun terdapat kendala utama pada aplikasi *photovoltaic* dan *fuel cell* yaitu memiliki tegangan keluaran yang rendah sehingga diperlukan sebuah konverter peningkat tegangan sebelum dapat diaplikasikan ke beban secara langsung. *DC-DC Boost converter* merupakan salah satu jenis konverter yang digunakan untuk menaikkan level tegangan keluaran. Konverter jenis ini banyak digunakan untuk menghubungkan sumber energi terbarukan dengan jala-jala maupun langsung ke beban. Konverter *boost* konvensional hanya mampu bekerja secara optimal saat digunakan pada rasio konversi 2-3 kali lipat tegangan inputnya sehingga untuk menyuplai beban yang membutuhkan level tegangan yang tinggi konverter konvensional tidak akan mampu. Oleh karena itu, diperlukan desain konverter yang memiliki kemampuan rasio konversi *gain* yang tinggi untuk menghasilkan tegangan keluaran sesuai level yang diinginkan.

Dalam penelitian ini akan membahas tentang desain dan implementasi *high voltage gain dc-dc boost converter* untuk aplikasi *fuel cell* sebagai topologi konverter peningkat tegangan dc. Pada pengujian, konverter ini memiliki rasio konversi hingga 4.5 kali dengan *duty cycle* sebesar 35% dan efisiensi konverter mencapai 85.57%.

Kata Kunci: *High Voltage Gain, DC-DC Boost Converter, Aplikasi Fuel Cell.*

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

ABSTRACT

Nowdays, research about potential of renewable energy has been getting popular especially on photovoltaics and fuel cells research fields. But there are major constraints on photovoltaic and fuel cell application which has a low output voltage therefore a converter that capable to boost the voltage is required before it can be applied to the load directly. DC-DC Boost converter is one type of converter that used to raise the level of the output voltage. Boost converters are widely used to connect a renewable energy source to the grid or directly to the load. Conventional boost converters only work optimally when used at a conversion rate of 2-3 times of their input voltage, so the conventional converter cannot supply high voltage loads. Hence, a converter design which has a high gain conversion capability is required to produce output voltage that can reach certain level according to the load.

In this final project will discuss the design and implementation of high voltage gain dc-dc boost converter for fuel cell applications as a dc voltage booster topology converter. In experiment, this converter has high ratio conversion 4.5 times with duty cycle 35% and efficiency of converter up to 85.57%.

Key Words: *High Voltage Gain, DC-DC Boost Converter, Fuel Cell Application.*

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah senantiasa saya panjatkan kehadirat Allah ‘Azza Wa Jalla. Karena atas limpahan barokah,rahmat dan hidayah-Nya, saya dapat menyelesaikan buku penelitian ini dengan judul **“Desain dan Implementasi High Voltage Gain DC-DC Boost Converter Untuk Aplikasi Fuel Cell”**. Buku ini saya persembahkan khususnya untuk keluarga saya dan umumnya untuk bahan referensi penelitian selanjutnya. “Man jadda wa jada”. Barang siapa bersungguh-sungguh, maka dia akan mendapatkan. Penulisan buku penelitian ini dilakukan dengan penuh semangat dan kesungguhan, namun saya menyadari bahwa buku penelitian ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saya mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk perbaikan pada penulisan buku-buku penelitian selanjutnya.

Selama pengerjaan penelitian ini banyak pihak-pihak yang membantu baik berupa doa, bimbingan dan jasa dalam menyelesaikan penelitian ini dan tidak lupa saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu saya Kanyi, Ayah saya Suwarno, Ketiga kakak saya serta seluruh keluarga besar yang tidak henti-hentinya memberikan motivasi, baik moral maupun material dalam penyelesaian buku penelitian ini.
2. Adik-adik kecilku : Arfa, Arka, Adit, Vian, Ayu dan Vita yang sangat mampu memberikan semangat sehingga penelitian ini dapat terealisasi tepat waktu.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Suwito, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.
4. Seseorang disana yang masih digenggam takdir, yang senantiasa memberikan doa yang sangat berarti untuk segera menyelesaikan penelitian ini.
5. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi yang setiap hari menemani : Mendung, Indra, Fahad, Jiwo, Akbar, Syarif, Putri, Friska, Nafiar, Alifi, Bayu dan seluruh asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik angkatan 2014.
6. Teman-teman seperjuangan, angkatan e-53 yang “Asik-Asik Joss”.
7. Teman-teman kontrakan *Cave House* yakni Miftah, Eko, Ahmad, Mbodo dan Bayu yang sama-sama berjuang dan terus saling memberikan semangat.

8. Mas Aldi, Mas Ridwan, Mbak Dini, Mbak Niken dan seluruh mahasiswa S2 yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama pengerjaan penelitian ini.
9. Dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis mengucapkan terima kasih atas segala doa dan dukungan yang telah diberikan selama ini. Penulis pun memohon maaf atas segala kekurangan pada penelitian ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2017

Irawan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	4

BAB 2 *HIGH VOLTAGE GAIN DC-DC BOOST CONVERTER* UNTUK APLIKASI FUEL CELL

2.1 <i>DC-DC Boost Converter</i>	7
2.2 Rangkaian Pelipatganda Tegangan atau Voltage Multiplier.....	8
2.3 <i>Boost Converter</i> Menggunakan Rangkaian Pelipatganda Tegangan	11
2.3.1 Analisis Mode 1 : Saklar Tertutup (<i>Switch On</i>) ...	14
2.3.2 Analisis Mode 2 : Saklar Terbuka (<i>Switch Off</i>) ...	18
2.3.3 Penurunan Persamaan Rasio Konversi.....	20
2.3.4 Penurunan Parameter Komponen.....	23
2.4 Sel Bahan Bakar atau <i>Fuel Cell</i>	28

BAB 3 DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI KONVERTER

3.1 Desain Parameter Elektris	35
3.2 Frekuensi dan <i>Duty cycle</i>	36
3.3 Parameter Induktor.....	37

3.4	Parameter Kapasitor.....	38
3.5	Parameter Beban.....	40
3.6	Simulasi Rangkaian <i>High Voltage Gain DC-DC Boost Converter</i> (HVGBC).....	41
3.7	Implementasi Rangkaian <i>High Voltage Gain DC-DC Boost Converter</i> (HVGBC).....	46
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA		
4.1	Alat Pengujian HVGBC.....	53
4.2	Pengujian Sinyal PWM.....	54
4.3	Pengujian Sinyal Pensaklaran pada Dioda.....	55
4.4	Pengujian Arus dan Tegangan pada Induktor	56
4.5	Pengujian Tegangan Kapasitor.....	58
4.6	Pengujian Tegangan Keluaran	59
4.7	Pengujian Rasio Konversi	60
4.8	Pengujian Efisiensi	62
4.9	Pengujian Menggunakan Modul <i>Fuel Cell</i>	63
BAB 5 PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	65
5.2	Saran	65
DAFTAR PUSTAKA		67
LAMPIRAN.....		69
RIWAYAT HIDUP PENULIS		73

TABLE OF CONTENTS

TITLE PAGE	
STATEMENT OF AUTHENTICITY SHEET	
CERTIFICATIO SHEET	
ABSTRACT (INDONESIA)	i
ABSTRACT	iii
PREFACE	v
TABLE OF CONTENTS	vii
LIST OF FIGURES	xi
LIST OF TABLES	xiii

CHAPTER 1 INTRODUCTION

1.1 Background.....	1
1.2 Problems	2
1.3 Purpose	2
1.4 Scope of Problems	2
1.5 Methodology	3
1.6 Writing Systematics	4
1.7 Relevance	4

CHAPTER 2 HIGH VOLTAGE GAIN DC-DC BOOST CONVERTER FOR FUEL CELL APPLICATION

2.1 DC-DC Boost Converter	7
2.2 Voltage Multiplier	8
2.3 Boost Converter With Voltage Multiplier Circuit	11
2.3.1 Mode Analysis 1 : Switch On	14
2.3.2 Mode Analysis 2 : Switch Off	18
2.3.3 Explanation of Ratio Conversion Equation	20
2.3.4 Explanation of Component Parameter	23
2.4 Fuel Cell	28

CHAPTER 3 DESIGN, SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF CONVERTER

3.1 Electrical Parameter Design	35
3.2 Frequency and Duty cycle	36
3.3 Inductor Parameter	37
3.4 Capacitor Parameter	38

3.5	Load Parameter.....	40
3.6	Simulation of High Voltage Gain DC-DC Boost Converter (HVGBC) Circuit	41
3.7	Implementation of High Voltage Gain DC-DC Boost Converter (HVGBC) Circuit	46
CHAPTER 4 EXPERIMENT AND DATA ANALYSIS		
4.1	HVGBC Testing Tool.....	53
4.2	PWM Testing Signal.....	54
4.3	Switching Signal Test on Diode.....	55
4.4	Voltage and Current Inductor Test	56
4.5	Capacitor Voltage Test	58
4.6	Output Voltage Test.....	59
4.7	Conversion Ratio Test.....	60
4.8	Efficiency Test	62
4.9	Testing With Fuel Cell Module.....	63
CHAPTER 5 APPENDIX		
5.1	Conclusion	65
5.2	Suggestion.....	65
REFERENCES		67
ATTACHMENT.....		69
BIOGRAPHY		73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema sistem <i>fuel cell</i> terhubung beban	7
Gambar 2.2	Pelipatganda tegangan topologi A	9
Gambar 2.3	Pelipatganda tegangan topologi B.....	9
Gambar 2.4	Pelipatganda tegangan topologi AxA.....	10
Gambar 2.5	Pelipatganda tegangan topologi BxB	10
Gambar 2.6	Rangkaian <i>boost converter</i> dengan rangkaian <i>voltage multiplier</i>	12
Gambar 2.7	Bentuk gelombang komponen rangkaian <i>boost converter</i> dengan rangkaian <i>voltage multiplier</i>	14
Gambar 2.8	Rangkaian <i>boost converter</i> saat <i>switch ON</i> (Mode1)	15
Gambar 2.9	Rangkaian <i>boost converter</i> saat <i>switch OFF</i> (Mode2).....	18
Gambar 2.10	Gambaran sederhana <i>fuel cell</i>	30
Gambar 2.11	Karakteristik <i>fuel cell</i> V dan I.....	32
Gambar 2.12	Karakteristik <i>fuel cell</i> : Vol.Gas dan P.....	33
Gambar 2.13	Karakteristik <i>fuel cell</i> : P dan I	33
Gambar 3.1	Diagram blok rangkaian <i>High Voltage Gain DC-DC Boost Converter</i>	35
Gambar 3.2	Simulasi <i>High Voltage Gain DC-DC Boost Converter</i> dengan rangkaian pelipatganda tegangan.....	42
Gambar 3.3	Bentuk gelombang arus dan tegangan rangkaian HVGBC	43
Gambar 3.4	Bentuk gelombang tegangan pada komponen penyaklaran sisi <i>drain-source</i> dan <i>gate-source</i> (VDS dan VGS)	44
Gambar 3.5	Bentuk gelombang tegangan dan arus pada komponen induktor L1 dan L2	45
Gambar 3.6	Bentuk gelombang arus pada komponen kapasitor C, C ₁ dan C ₂	45
Gambar 3.7	Bentuk gelombang tegangan <i>input</i> , tegangan <i>output</i> dan daya <i>output</i>	46
Gambar 3.8	Diagram blok implementasi rangkaian HVGBC	47
Gambar 3.9	Implementasi HVGBC	51

Gambar 4.1	Alat pengujian	53
Gambar 4.2	Bentuk gelombang pensaklaran MOSFET.....	54
Gambar 4.3	Bentuk sinyal pensaklaran pada dioda D_1 , D_2 , D_{m1} , D_{m2} dan D_3	55
Gambar 4.4	Bentuk gelombang tegangan dan arus induktor.....	57
Gambar 4.5	Tegangan kapasitor C , C_1 dan C_2	58
Gambar 4.6	Gelombang tegangan keluaran konverter	60
Gambar 4.7	Grafik pengujian rasio konversi	61
Gambar 4.8	Grafik pengujian efisiensi konverter	62
Gambar 4.9	Peralatan pengujian konverter menggunakan modul <i>fuel cell</i>	63
Gambar 4.10	Grafik pengujian menggunakan modul <i>fuel cell</i>	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rasio tegangan topologi pelipatganda tegangan	11
Tabel 2.2	Spesifikasi <i>fuel cell</i> Horizon 1000	31
Tabel 3.1	Spesifikasi parameter awal desain HVGBC.....	36
Tabel 3.2	Nilai parameter komponen rangkaian HVGBC	41
Tabel 3.3	<i>Datasheet</i> inti induktor (L_1 dan L_2)	48

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi semakin berkembang pesat dalam setiap aspek kehidupan, hal ini sebanding dengan kebutuhan manusia yang semakin besar. Mobilitas manusia yang tinggi menuntut efisiensi waktu dan tenaga. Dalam memenuhi kebutuhan manusia diperlukan berbagai sumber energi yang kompeten. Sumber energi terbesar saat ini berasal dari bahan bakar fosil yang jumlahnya semakin berkurang. Oleh sebab itu diperlukan sumber energi alternatif yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan seperti *photovoltaic* dan *fuel cell*. Dalam penerapan *PV* dan *fuel cell* diperlukan suatu rangkaian elektronika daya yang berguna untuk mengkonversikan energi pembangkitan. Tegangan keluaran sistem elektronika daya ini dapat dinaikan maupun diturunkan [1].

Photovoltaic dan *fuel cell* telah banyak diteliti untuk dimanfaatkan pada mobil listrik. Kendala utama pada *photovoltaic* dan *fuel cell* terletak pada tegangan DC keluaran yang sangat rendah sehingga diperlukan konverter peningkat tegangan sebelum terhubung dengan beban. Cara yang paling umum digunakan untuk meningkatkan tegangan DC yaitu menggunakan konverter *Boost*. Konverter *Boost* adalah alat yang digunakan untuk meningkatkan tegangan DC keluaran dari *photovoltaic* atau *fuel cell* dengan cara mengatur *duty cycle*. Semakin tinggi nilai *duty cycle* maka rasio peningkatan tegangan semakin besar. Dalam implementasinya terdapat berbagai kendala dalam penyusunan konverter menggunakan *PV* dan *fuel cell* sebagai sumber daya yaitu tegangan keluaran boost konverter terbatas sampai 2-3 tegangan *input* [2]. Hal ini dapat diatasi dengan mengatur pensaklaran secara analog/digital pada saat sumber mencapai titik maksimum daya yang mampu dibangkitkan. Dan dengan penerapan pengganda tegangan atau *voltage multiplier* pada rangkaian konverter. Keuntungan menggunakan pengganda tegangan yakni mampu mengurangi stres tegangan pada peralatan [3].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka penulis mengusulkan menggunakan topologi *high gain DC-DC boost converter* dengan rangkaian *voltage multiplier* menggunakan metode pengaturan

pensaklaran MOSFET secara digital menggunakan program arduino untuk meningkatkan level tegangan keluaran *fuel cell*.

1.2 Perumusan Masalah

Tegangan keluaran dari sumber energi baru terbarukan (*fuel cell*) masih sangat rendah sehingga ketika akan dihubungkan ke beban maka tegangan masukan harus dinaikan. Peningkatan level tegangan pada suatu sistem berbeda-beda sesuai dengan level tegangan yang dibutuhkan. Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah mendesain dan mengimplementasikan *High Gain DC-DC Boost Converter* untuk aplikasi *fuel cell*.

1.3 Tujuan

Tujuan penulisan penelitian ini adalah:

1. Mendesain dan mengimplementasikan *High Voltage Gain DC-DC Boost Converter* untuk aplikasi *fuel cell*
2. Mengetahui hal-hal yang berkaitan dengan *High Voltage Gain DC-DC Boost Converter*
3. Membandingkan dan menganalisis hasil implementasi *High Voltage Gain DC-DC Boost Converter* dari hasil desain dengan hasil simulasi perangkat lunak.
- 4.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Desain dan implementasi alat dilakukan untuk rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter*.
2. Implementasi alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang terdapat di pasaran dan peralatan di Laboratorium Konversi Energi Listrik.
3. Pengujian alat menggunakan sumber tegangan DC variabel dan modul *fuel cell* Horizon 1000 yang terdapat pada Laboratorium Konversi Energi Listrik.
4. Semua analisis dan perhitungan dilakukan dalam kondisi ideal.

1.5 Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari:

1. Studi literatur

Yaitu mempelajari topologi *dc-dc boost converter*, *voltage multiplier*, termasuk rangkaian kontrol untuk menghasilkan peningkatan tegangan DC. Rangkaian kontrol digunakan untuk mengatur kerja saklar MOSFET.

2. Desain dan Simulasi Alat

Rangkaian sistem *dc-dc boost converter* dengan pengganda tegangan disimulasikan menggunakan perangkat lunak PSIM, simulasi dilakukan berdasarkan sumber literatur yang telah dibaca oleh penulis. Dalam desain alat yang akan diciptakan terdapat pertimbangan dan perubahan dari nilai komponen yang digunakan serta *duty cycle* sehingga tegangan keluaran konverter sesuai dengan apa yang diinginkan penulis. Komponen yang digunakan dalam simulasi merupakan komponen ideal sehingga rugi-rugi tidak diperhitungkan. Data hasil simulasi merupakan data primer yang digunakan sebagai pembandingan dari implementasi alat yang dikerjakan oleh penulis.

3. Implementasi Alat

Hasil simulasi diimplementasikan dengan membuat rangkaian *high gain* DC-DC boost converter. Dalam proses implementasi alat dilakukan pemilihan dan pembelian komponen sesuai desain yang telah dipersiapkan. Komponen yang digunakan yaitu *fuel cell*, Saklar MOSFET, Kapasitor, Induktor, Dioda dan Arduino UNO. Setelah itu, dilakukan pengujian dan pengukuran tegangan serta arus pada alat yang telah dibuat yaitu *high gain DC-DC boost converter for fuel cell application*.

4. Penyusunan Laporan

Setelah dilakukan pengujian implementasi alat *high voltage gain DC-DC boost converter* dengan rangkaian *voltage multiplier* maka data yang didapatkan akan dianalisis dan dibandingkan dengan data primer hasil simulasi yang telah dibuat. Hasil analisis akan digunakan dalam pembuatan kesimpulan dan semua hasil yang telah dikerjakan diatas akan ditulis menjadi sebuah buku penelitian.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab terurai sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi penelitian ini.

BAB 2 Dasar Teori

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang *high voltage gain dc-dc boost converter* untuk aplikasi *fuel cell*. Pada bab 2 akan dibahas mengenai konverter boost konvensional, konverter boost dengan rangkaian pengganda tegangan dan sistem *fuel cell*.

BAB 3 Desain, Simulasi, dan Implementasi

Bab ini berisi mengenai desain *high voltage gain dc-dc boost converter* secara matematis, simulasi rangkaian menggunakan perangkat lunak PSIM dan implementasi *high voltage gain dc-dc boost converter*. Desain rangkaian secara matematis berupa penurunan rumus untuk mencari nilai parameter rangkaian yang digunakan seperti nilai induktor dan kapasitor.

BAB 4 Pengujian dan Analisis Data

Bab ini berisi pengujian dan analisis data terhadap *high voltage gain dc-dc boost converter* dari hasil simulasi dan implementasi. Pengujian yang dilakukan merupakan pengujian dalam skala laboratorium.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan yang dapat diambil dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk penelitian selanjutnya.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari pelaksanaan penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, sebagai berikut :

1. Mengimplementasikan rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* untuk aplikasi *fuel cell* yang mempunyai keluaran tegangan DC.
2. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan konverter khususnya mengenai *boost converter* menggunakan *fuel cell* dan energi baru terbarukan lainnya.
3. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak mengambil masalah serupa untuk penelitian selanjutnya.

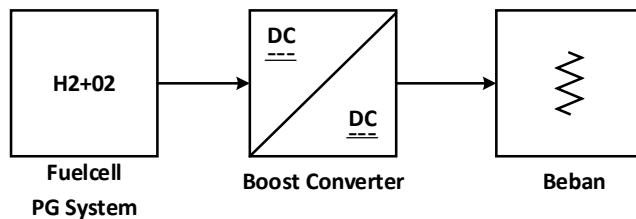
--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 2

HIGH VOLTAGE GAIN DC-DC BOOST CONVERTER UNTUK APLIKASI FUEL CELL

2.1 DC-DC Boost Converter

DC- DC boost converter merupakan jenis konverter yang digunakan untuk meningkatkan tegangan keluaran menjadi lebih besar daripada tegangan masukan dan mengurangi *ripple* keluaran [4]. Untuk mengurangi besar riak tegangan, digunakan filter kapasitor yang pada umumnya dipasang pada bagian keluaran konverter (filter sisi beban). Untuk mengurangi riak arus, digunakan induktor yang dipasang pada bagian *input* konverter (filter sisi masukan). Daya *input boost converter* bisa berasal dari berbagai peralatan sumber DC. Salah satu aplikasinya yaitu dengan menggunakan sel bahan bakar atau “*fuel cell*”. Karena tegangan keluaran *fuel cell* masih sangat rendah maka diperlukan *boost converter* sebagai rangkaian peningkatan tegangan keluaran *fuel cell* hingga mencapai nilai yang cukup sebelum terhubung dengan beban. Berikut skema rangkaian aplikasi *fuel cell* sebagai *input boost converter* terhubung beban:



Gambar 2.1 Skema sistem *fuel cell* terhubung beban.

Nilai tegangan DC yang digunakan untuk mensuplai beban didapat dari tegangan *output* konverter. Nilai tegangan keluaran DC-DC *boost converter* dapat diatur dengan cara merubah nilai *duty cycle* dari saklar semikonduktor (MOSFET). Sesuai persamaan berikut:

$$V_o = V_s \frac{1}{1-D} \quad (2.1)$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan untuk menghitung tegangan *output* sebagai fungsi tegangan *input* dan *duty cycle* [5]. MOSFET yang digunakan pada rangkaian *DC-DC boost converter* bertindak sebagai saklar yang dapat membuka dan menutup rangkaian sehingga arus dapat dikendalikan sesuai dengan *duty cycle* yang diinginkan. Besarnya nilai *duty cycle* yang diinginkan diatur oleh sinyal *pulse width modulation* (PWM) [10]. Dari persamaan diketahui bahwa besar nilai tegangan keluaran *boost converter* sebanding dengan besar *duty cycle* yang digunakan dan berlaku sebaliknya.

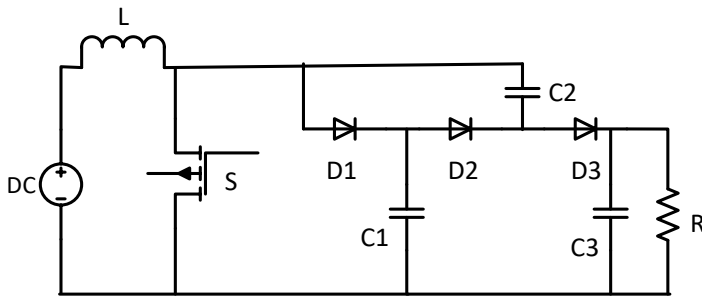
2.2 Rangkaian Pelipatganda Tegangan atau *Voltage Multiplier*

Voltage multiplier merupakan sebuah sirkuit elektronik yang berfungsi untuk melipat gandakan tegangan *input* menjadi tegangan *output* DC yang lebih besar. Pemanfaatan rangkaian pengganda tegangan banyak diterapkan pada peralatan sinar X, sistem elektrostatis dan laser. Akhir-akhir ini aplikasi rangkaian pengganda tegangan banyak berkembang untuk sistem rangkaian energi baru terbarukan seperti sel surya dan *fuel cell* [6]. Rangkaian pelipat ganda tegangan dibuat dengan komponen dasar dioda dan kapasitor. Rangkaian pelipat ganda tegangan dapat dibuat dalam beberapa tingkat. Pada setiap tingkat terdiri dari satu dioda dan satu kapasitor [1]. Rangkaian pelipat ganda tegangan banyak digunakan pada pembangkitan tegangan tinggi namun dengan arus keluaran yang kecil.

Rangkaian pengganda tegangan bisa diterapkan dalam rangkaian frekuensi rendah maupun tinggi. Dalam rangkaian frekuensi tinggi dengan tegangan keluaran yang tinggi, rangkaian pengganda tegangan mampu mengurangi masalah yang timbul akibat frekuensi tinggi dan akibat transfer daya pada tegangan tinggi [1]. Pengoperasian pada frekuensi tinggi akan memberi keuntungan pada pengurangan ukuran kapasitor, dan memperbesar kemungkinan implementasi pada satu rangkaian sirkuit terpadu. Keuntungan lain dari rangkaian pengganda

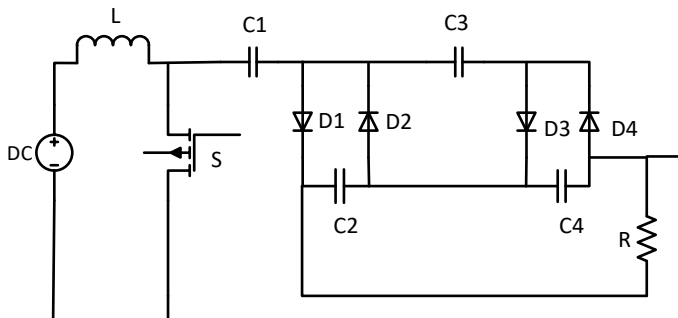
tegangan adalah mampu mencapai *gain* yang tinggi tanpa memerlukan transformator. Rangkaian pelipat ganda tegangan diterapkan setelah rangkaian utama dc-dc konverter dan terhubung dengan *output*. Hingga saat ini telah banyak dikembangkan topologi rangkaian pelipat ganda tegangan DC, topologi –topologi tersebut sebagian besar berdasarkan topologi Cockcroft-Walton dan Dickson yang terhubung dengan rangkaian *boost converter*. Berikut beberapa contoh rangkaian pelipatganda tegangan yang terhubung beban pada skema rangkaian.

1. Topologi A



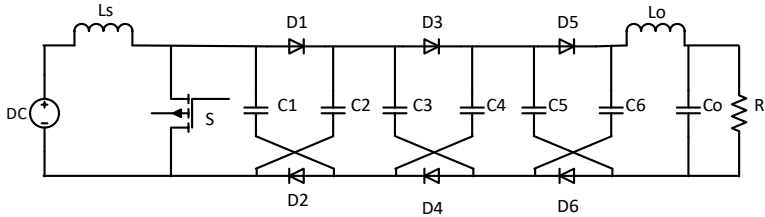
Gambar 2.2 Pelipatganda tegangan topologi A

2. Topologi B



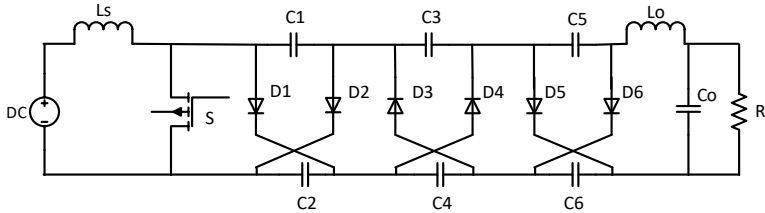
Gambar 2.3 Pelipatganda tegangan topologi B

3. Topologi AxA



Gambar 2.4 Pelipatganda tegangan topologi AxA

4. Topologi BxB



Gambar 2.5 Pelipatganda tegangan topologi BxB

Pada setiap topologi rangkaian memiliki mode pengisian ulang kapasitor yang melalui saklar, melalui dioda dan melewati komponen *parasitic* yang memiliki nilai induktansi dan resistansi yang berperan besar atas terjadinya rugi daya [11]. Rugi daya ini dapat dikurangi dengan cara memperbesar nilai kapasitansi kapasitor yang digunakan. Pada setiap jenis topologi memiliki tahanan dalam masing-masing sehingga memiliki drop tegangan yang berbeda-beda. Pada rangkaian *high voltage gain dc boost converter* yang diimplementasikan dapat diketahui menggunakan jenis topologi BxB. Dibandingkan dengan jenis lain, topologi ini mampu menghasilkan tegangan *output* yang lebih besar dengan jumlah sel yang sama. Berikut tabel rasio tegangan untuk beberapa topologi rangkaian pelipatganda tegangan:

Tabel 2.1 Rasio tegangan topologi pelipatganda tegangan

Topologi	A	B	AxA	BxB
$M = \frac{V_o}{V_i}$	$\frac{N + 1}{2(1 - D)}$	$\frac{N}{2(1 - D)}$	$\frac{(N + D)}{(1 - D)}$	$\frac{(N + D)}{(1 - D)}$

N = jumlah kapasitor pada topologi

Topologi jenis AxA dan BxB pada setiap selnya memiliki dua dioda dan dua kapasitor. Topologi AxA dan BxB lebih utama digunakan dengan jumlah sel ganjil, karena untuk jumlah sel genap topologi ini tidak mampu menghasilkan peningkatan tegangan yang signifikan [6].

Berdasarkan gambar 2.5 diketahui untuk beban yang kecil, kapasitor besar dan mengabaikan drop tegangan yang terjadi pada komponen maka ratio tegangan untuk topologi BxB dengan 3 kapasitor dapat dihitung sebagai berikut:

$$M = \frac{(N+D)}{(1-D)}$$

$$M = \frac{(3+D)}{(1-D)} \quad (2.12)$$

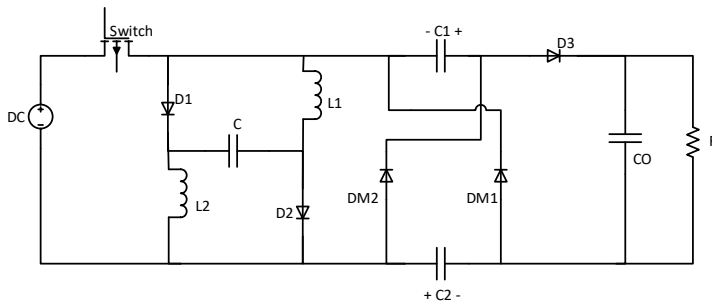
Persamaan ini sesuai dengan perhitungan yang dikerjakan untuk mencari rasio konversi energi (persamaan 2.42) pada sub bab 2.3.3.

2.3 Boost Converter Menggunakan Rangkaian Pengganda Tegangan

Untuk mencapai nilai *gain* keluaran konverter yang tinggi maka rangkaian boost converter dikombinasikan dengan rangkaian pengganda tegangan atau “*voltage multiplier*”. Hasil keluaran tegangan *output boost converter* mempunyai polaritas yang sama dengan tegangan *input*. *Boost converter* ini terdiri dari sumber tegangan arus searah, induktor pada sisi *input* (L_1 dan L_2), kapasitor pentransfer tegangan (C , C_1 dan C_2),

pensaklaran atau *switch*, dioda (D_1 , D_2 , D_3 , DM_1 dan DM_2), kapasitor filter pada sisi *output* (C_o) dan beban resistif (R). Induktor pada sisi *input* berfungsi sebagai filter arus dari sumber tegangan DC. Induktor ini berguna untuk mengurangi riak gelombang *input* yang masuk ke sistem rangkaian *boost converter*.

Kelebihan dari rangkaian *boost converter* ini adalah rangkaian sistem yang sederhana sehingga secara ekonomis mengurangi biaya konstruksi. Mampu menghasilkan *gain* yang tinggi dengan penurunan nilai *duty cycle* yang digunakan, Penurunan rating mosfet sebagai saklar otomatis. Kekurangan dari rangkaian konverter ini adalah tingkat efisiensi yang kurang tinggi dan besarnya losses daya yang terjadi pada rangkaian. Gambar 2.3 menunjukkan rangkaian *boost converter* dengan rangkaian *voltage multiplier* yang diimplementasikan.



Gambar 2.6 Rangkaian *boost converter* dengan rangkaian *voltage multiplier*

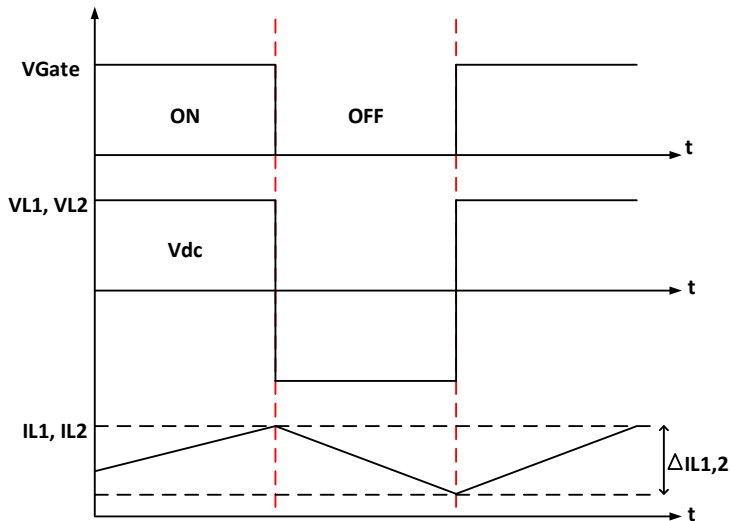
Analisis yang dilakukan pada rangkaian *boost converter* berdasarkan beberapa asumsi, sebagai berikut:

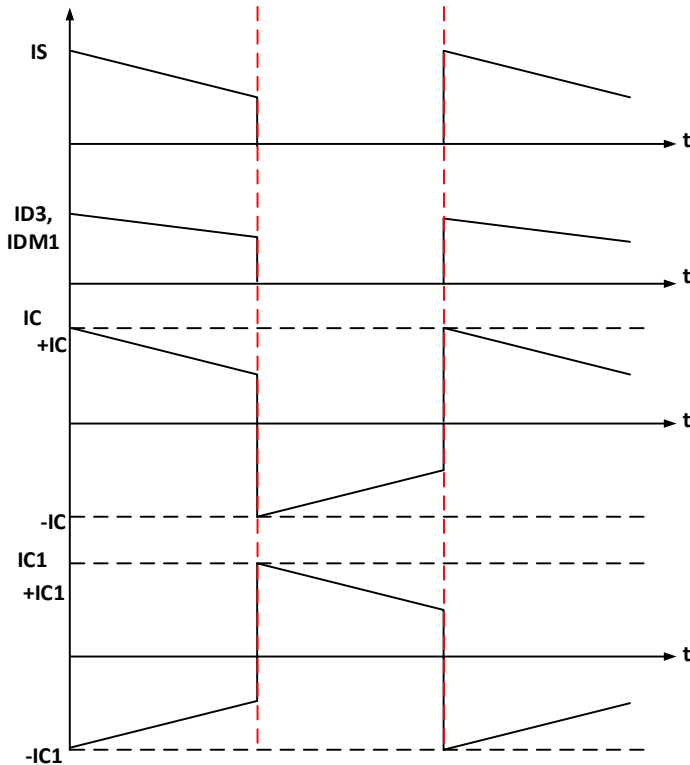
1. Induktor yang digunakan (L_1 dan L_2) memiliki nilai induktansi yang cukup besar. Hal ini diterapkan untuk mengurangi riak arus masukan.
2. Kapasitor yang digunakan memiliki nilai kapasitansi yang cukup besar. Hal diterapkan dengan maksud untuk mengurangi riak tegangan keluaran. Sehingga dihasilkan tegangan yang stabil.
3. Dioda dan Mosfet yang digunakan merupakan komponen ideal yang mempunyai rating sesuai kebutuhan sistem.
4. *Duty cycle* yang diterapkan sesuai dengan nilai perhitungan matematis. Saklar mosfet *ON* saat t_{on} . Sesuai persamaan $t_{on} = DT$.

D merupakan besarnya nilai *duty cycle* yang digunakan. T merupakan periode gelombang atau waktu yang dibutuhkan untuk membentuk satu gelombang. Saklar mosfet *OFF* saat t_{off} . Sesuai persamaan $t_{off} = T - t_{on}$ atau $(1-D)T$.

5. Sistem rangkaian *boost converter* dioperasikan pada keadaan tunak/stabil.
6. Komponen rangkaian yang digunakan disesuaikan dengan yang tersedia di pasaran.

Prinsip kerja rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* sama dengan rangkaian *boost converter* konvensional yang dapat diamati dalam 2 keadaan yaitu saat saklar mosfet *ON* dan *OFF*. Dibawah ini merupakan gambar pola gelombang pada rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* yang diimplementasikan. Yang terdiri dari gelombang komponen pensaklaran MOSFET pada sisi *gate*, gelombang tegangan dan arus induktor, arus dioda D_3, DM_1 dan arus kapasitor C, C_1 .



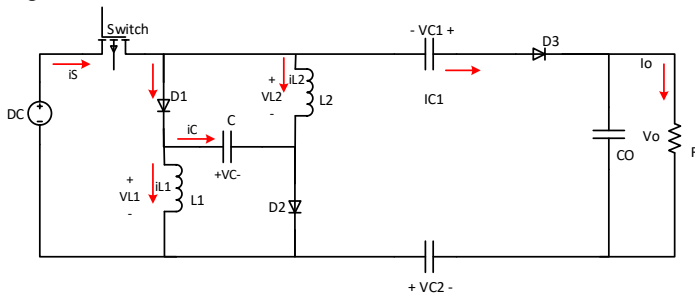


Gambar 2.7 Bentuk gelombang komponen rangkaian *boost converter* dengan rangkaian *voltage multiplier*

V_{gate} merupakan tegangan yang terdapat di saklar mosfet pada sisi GS (*Gate-Source*). V_{L1} dan V_{L2} merupakan tegangan pada induktor L1 dan L2 pada sisi *input* rangkaian. Gelombang V_{L1} dan V_{L2} memiliki bentuk, polaritas dan nilai yang sama. I_{L1} dan I_{L2} merupakan arus yang mengalir pada induktor L1 dan L2. I_s merupakan arus yang melewati saklar mosfet menuju gerbang *drain*. I_{D3} dan I_{DM1} merupakan arus yang mengalir melewati dioda D₃ dan dioda DM₁. I_C dan I_{C1} merupakan arus yang mengalir melewati kapasitor C dan C₁ yang berperan sebagai kapasitor pentransfer tegangan.

2.3.1. Analisis Mode 1 : Saklar Tertutup (Switch On)

Ketika saklar dalam keadaan tertutup atau *ON*, saklar terhubung seri dengan sumber *input*. Sebelum menganalisis rangkaian pada mode 1 diasumsikan bahwa kapasitor C_1 dan C_2 telah *full charge*. Ketika saklar tertutup (*switch ON*) maka dioda D_1 , D_2 dan D_3 dalam keadaan *forward biased*. Sedangkan dioda DM_1 dan DM_2 dalam keadaan *reverse biased* (*open*). Sehingga terjadi proses pengisian pada induktor L_1 , L_2 dan kapasitor C . 2 kapasitor yang berperan dalam proses pengganda tegangan mengalami *discharge* yaitu kapasitor C_1 dan C_2 . Gambar 2.12 merupakan rangkaian *boost converter* saat *switch ON*.



Gambar 2.8 Rangkaian *boost converter* saat *switch ON* (Mode 1)

Saat saklar tertutup, arus mengalir melewati 2 induktor L_1 dan L_2 , kapasitor kemudian menuju ke negatif sumber. Induktor dan kapasitor C mengalami proses *charging*. Arus yang mengalir dan mengisi induktor L_1 dan L_2 besarnya sama. Pada rangkaian pengganda tegangan, kapasitor C_1 C_2 terisi secara paralel dan terdischarge secara seri. Pada mode 1 dengan beroperasinya 2 pengganda tegangan akan menambah tegangan keluaran konverter. Sekarang kapasitor C_1 dan C_2 telah *discharge*. Proses *discharge* kapasitor C_1 dan C_2 melewati kapasitor C_O , beban resistif R dan ke negatif sumber masukan. Pada mode operasi 1 (*switch ON*) 2 kapasitor pengganda tegangan bekerja untuk meningkat tegangan keluaran konverter. Rangkaian *boost converter* pada gambar 2.12 dapat diamati dengan menerapkan prinsip *Khirchoff Voltage Law* (KVL). Prinsip ini menerangkan bahwa “Jumlah tegangan pada suatu rangkaian tertutup = 0”.

Loop 1

Pada loop ini arus mengalir melewati induktor L_1 dan sumber DC (V_{DC}). Dengan menerapkan analisis rangkaian loop tertutup diperoleh persamaan matematis sebagai berikut:

$$-V_{DC} + V_{L1} = 0 \quad (2.13)$$

Dengan memindahkan V_{DC} ke ruas kanan maka akan didapat persamaan baru sebagai berikut:

$$V_{L1} = V_{DC} \quad (2.14)$$

Dari persamaan 2.14 diatas dapat diketahui bahwa nilai tegangan induktor L_1 mempunyai nilai yang sama dengan nilai tegangan sumber DC yang digunakan.

Loop 2

Pada loop ini arus mengalir melewati induktor L_2 dan C. Dengan menerapkan analisis rangkaian loop tertutup diperoleh persamaan matematis sebagai berikut:

$$V_{L2} - V_C = 0 \quad (2.15)$$

Dengan memindah ruaskan V_C ke sisi sebelah kanan akan didapat persamaan baru sebagai berikut:

$$V_{L2} = V_C \quad (2.16)$$

Dari persamaan 2.16 diatas dapat diketahui bahwa nilai tegangan pada induktor L_2 mempunyai nilai yang sama dengan nilai tegangan kapasitor C.

Loop 3

Pada loop ini arus mengalir melewati kapasitor C dan induktor L_1 . Dengan menerapkan analisis rangkaian loop tertutup diperoleh persamaan matematis sebagai berikut:

$$V_C - V_{L1} = 0 \quad (2.17)$$

Dengan memindahkan V_{L1} ke ruas sisi kanan maka akan didapat persamaan baru sebagai berikut:

$$V_C = V_{L1} \quad (2.18)$$

Dari persamaan 2.18 diatas diketahui bahwa nilai tegangan pada kapasitor C mempunyai nilai yang sama dengan tegangan induktor L_1 .

Loop 4

Pada loop ini arus mengalir melewati induktor L_2 dan sumber DC (V_{DC}). Dengan menerapkan analisis rangkaian loop tertutup diperoleh persamaan matematis sebagai berikut:

$$V_{L2} - V_{DC} = 0 \quad (2.19)$$

Dengan memindah ruaskan V_{DC} ke sisi sebelah kanan maka akan diperoleh persamaan matematis baru sebagai berikut:

$$V_{L2} = V_{DC} \quad (2.20)$$

Dari persamaan 2.20 diatas dapat diketahui bahwa nilai tegangan pada induktor L_2 memiliki nilai yang sama dengan nilai tegangan sumber DC (V_{DC}).

Loop 5

Pada loop ini arus mengalir melewati kapasitor C_1 , kapasitor C_2 , kapasitor C_0 , beban resistif R dan induktor L_2 . Nilai tegangan pada kapasitor C_0 sama dengan nilai tegangan beban resistif R. Sehingga untuk mempermudah analisis loop rangkaian dapat disederhanakan menjadi $V_{C0} = V_R = V_O$. Dengan menerapkan analisis rangkaian loop tertutup diperoleh persamaan matematis sebagai berikut:

$$-V_{C1} + V_O - V_{C2} - V_{L2} = 0 \quad (2.21)$$

Dengan memindah ruaskan V_{L2} ke sisi sebelah kanan maka diperoleh persamaan matematis baru sebagai berikut:

$$V_{L2} = -V_{C1} + V_O - V_{C2}$$

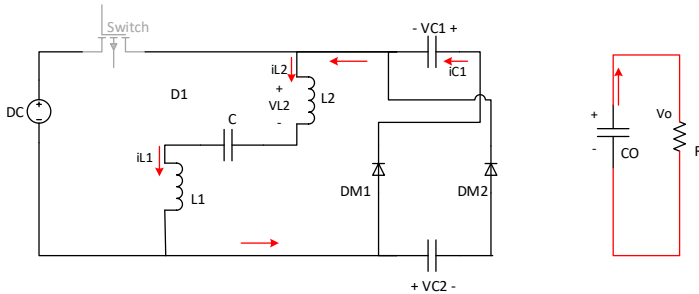
$$V_{L2} = V_O - V_{C1} - V_{C2}$$

$$V_{L2} = V_O - (V_{C1} + V_{C2}) \quad (2.22)$$

Dari persamaan yang diperoleh pada loop 1 sampai dengan loop 4 dapat diketahui bahwa nilai tegangan induktor L_1 sama dengan nilai tegangan induktor L_2 ($V_{L1} = V_{L2}$).

2.3.2. Analisi Mode 2 : Saklar Terbuka (*Switch Off*)

Pada mode operasi 2 saklar terhubung seri dengan sumber tegangan yang mati/*off*. Selama mode 2 arus induktor telah mencapai titik maksimum, dioda D_1 dan D_2 dalam kondisi *reverse biased* dan kapasitor C_o dalam keadaan *discharge*. Arus mengalir melalui melalui dioda DM_1 , DM_2 dan mengisi kapasitor C_1 dan C_2 . Arus berasal dari proses *discharge* oleh 2 induktor (L_1 dan L_2) dan kapasitor C . Karena adanya arus *discharge* kapasitor C_o membuat dioda D_3 dalam kondisi *reverse biased* sehingga beban R terputus dari sumber V_{DC} . Kapasitor C_o berfungsi mengisi beban R selama mode 2 atau pada saat saklar *OFF* karena C_o dan R berada dalam satu loop dan terhubung seri. Gambar 2.13 menunjukkan rangkaian *boost converter* pada saat kondisi *switch OFF* (Mode 2).



Gambar 2.9 Rangkaian *boost converter* saat *switch OFF* (Mode 2)

Kapasitor C_o telah mengalami proses *charge* yang setara dengan tegangan keluaran pada saat mode 1 atau saat saklar dalam kondisi *ON*. Karena ini sistem rangkaian mampu memberikan tegangan tinggi ke beban R selama kondisi saklar *ON* dan *OFF*. Pada mode 2 induktor L_1 ,

induktor L_2 dan kapasitor C mengalami proses *discharge* atau pengosongan muatan yang melewati kapasitor C_1 dan C_2 . Sehingga kapasitor C_1 dan C_2 mengalami proses *charge*. Rangkaian *boost converter* ada gambar 2.13 dapat diamati dengan menerapkan analisis loop tertutup sesuai prinsip *Khirchoff Voltage Law* (KVL).

Loop 1

Pada loop ini arus mengalir melewati komponen induktor L_2 , kapasitor C, induktor L_1 dan kapasitor C_2 . Dengan menerapkan analisis rangkaian loop tertutup diperoleh persamaan matematis sebagai berikut:

$$V_{L2} - V_C + V_{L1} + V_{C2} = 0 \quad (2.23)$$

Dengan memindah ruaskan V_C dan V_{C2} ke sisi kanan, diperoleh persamaan matematis baru sebagai berikut:

$$V_{L2} + V_{L1} = V_C - V_{C2} \quad (2.24)$$

Berdasarkan analisis mode 1 persamaan loop 1 sampai dengan loop 4 diketahui bahwa nilai $V_{L1} = V_{L2}$, sehingga persamaan matematis diatas dapat disederhanakan menjadi:

$$2V_{L1} = V_C - V_{C2} \quad (2.25)$$

Dari persamaan 2.25 diatas dapat diketahui bahwa nilai tegangan induktor L_1 (V_{L1}) sama dengan setengah dari nilai pengurangan tegangan kapasitor C (V_C) dengan tegangan kapasitor C_2 (V_{C2}).

Loop 2

Pada loop ini arus mengalir melewati komponen induktor L_2 , kapasitor C, induktor L_1 dan kapasitor C_1 . Dengan menerapkan analisis rangkaian loop tertutup diperoleh persamaan matematis sebagai berikut:

$$V_{L2} - V_C + V_{L1} + V_{C1} = 0 \quad (2.26)$$

Dengan memindah ruaskan V_C dan V_{C2} ke sisi kanan, diperoleh persamaan matematis baru sebagai berikut:

$$V_{L2} + V_{L1} = V_C - V_{C1} \quad (2.27)$$

Berdasarkan analisis mode 1 pada persamaan loop 1 sampai dengan loop 4 diketahui bahwa nilai $V_{L1} = V_{L2}$, sehingga persamaan matematis diatas dapat disederhanakan menjadi:

$$2V_{L1} = V_C - V_{C1} \quad (2.28)$$

Dari persamaan 2.28 diatas dapat diketahui bahwa nilai tegangan induktor L_1 (V_{L1}) saat proses *discharge* sama dengan setengah dari nilai pengurangan tegangan kapasitor C (V_C) dengan tegangan kapasitor C_1 (V_{C1}). Dari persamaan loop 1 dan loop 2 pada mode operasi 2 (*switch off*) dapat diketahui bahwa nilai tegangan kapasitor C_1 sama dengan nilai tegangan kapasitor C_2 ($V_{C1} = V_{C2}$). Kapasitor C_1 dan C_2 berperan sebagai kapasitor pada rangkaian pengganda tegangan.

2.3.3 Penurunan Persamaan Rasio Konversi

Penurunan persamaan rasio konversi dapat dilakukan dengan melakukan penurunan arus pada saat kondisi saklar terbuka (*ON*) dan pada saat kondisi saklar tertutup (*OFF*) Dengan menggunakan metode *inductor voltage-second balance*, maka besarnya nilai tegangan pada induktor dapat dirumuskan sesuai persamaan (2.29).

$$\int_0^T V_L dt = 0 \quad (2.29)$$

Metode *inductor voltage-second balance* diterapkan untuk masing-masing induktor. Untuk induktor $L1$ didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\int_0^{t_{on}} V_{L1(on)} + \int_{t_{on}}^T V_{L1(off)} = 0 \quad (2.30)$$

$t_{on} = DT$, D merupakan nilai *duty cycle* yang digunakan yaitu nilai perbandingan antara waktu saklar saat *ON* dengan periode pensaklaran. T merupakan periode pensaklaran atau waktu yang diperlukan untuk membentuk satu gelombang penuh. Dengan melakukan substitusi persamaan 2.14 dan persamaan 2.28 ke persamaan 2.30 didapatkan persamaan baru sebagai berikut:

$$\int_0^{DT} V_{L1(on)} + \int_{DT}^T V_{L1(off)} = 0$$

$$\int_0^{DT} V_{DC} + \int_{DT}^T 1/2(V_C - V_{C1}) = 0 \quad (2.31)$$

Integral pertama berlangsung pada saat saklar dalam keadaan tertutup (*ON*) yaitu pada rentang waktu antara 0 sampai dengan DT. Integral kedua berlangsung pada saat saklar dalam keadaan terbuka (*OFF*) yaitu terjadi pada rentang waktu antara DT sampai dengan T. Setelah dilakukan proses pengintegralan pada persamaan 2.31 diperoleh persamaan baru sebagai berikut:

$$V_{DC} \cdot (DT - 0) + \left(\frac{1}{2} \cdot (V_C - V_{C1}) \cdot (T - DT) \right) = 0 \quad (2.32)$$

Dengan melakukan proses operasi distribusi matematika pada persamaan 2.32 dapat diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{DC} \cdot DT + \frac{1}{2} \cdot (V_C - V_{C1}) \cdot (T - DT) = 0$$

$$V_{DC} \cdot DT + \frac{1}{2} \cdot (V_C - V_{C1}) \cdot T(1 - D) = 0 \quad (2.33)$$

Dengan melakukan eliminasi T pada setiap sisi ruas persamaan 2.33, diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{DC} \cdot D + \frac{1}{2} \cdot (V_C - V_{C1}) \cdot (1 - D) = 0 \quad (2.34)$$

Dari persamaan 2.22 loop 5 pada saat Mode 1 (*switch ON*) dapat diketahui bahwa:

$$V_{L2} = V_O - (V_{C1} + V_{C2}) \quad (2.35)$$

Dari persamaan 2.25 dan 2.28 pada saat mode 2 (*switch OFF*) dapat diketahui bahwa:

$$V_{C1} = V_{C2} \quad (2.36)$$

Dengan melakukan proses operasi substitusi matematika pada persamaan 2.35 dapat diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{L2} = Vo - 2V_{C1}$$

$$2V_{C1} = Vo - V_{L2}$$

$$V_{C1} = \frac{1}{2} \cdot (Vo - V_{L2})$$

$$V_{C1} = \frac{1}{2} \cdot (Vo - V_{DC}) \quad (2.37)$$

Dengan melakukan operasi substitusi persamaan 2.37 ke persamaan 2.34 diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{DC} \cdot D + \frac{1}{2} \cdot \left(V_C - \frac{1}{2} \cdot (Vo - V_{DC}) \right) \cdot (1 - D) = 0$$

$$V_{DC} \cdot D + \left(\frac{V_C}{2} - \frac{Vo}{4} + \frac{V_{DC}}{4} \right) \cdot (1 - D) = 0$$

$$V_{DC} \cdot D + \left(\frac{V_C}{2} - \frac{Vo}{4} + \frac{V_{DC}}{4} - \frac{V_C \cdot D}{2} + \frac{Vo \cdot D}{4} - \frac{V_{DC} \cdot D}{4} \right) = 0 \quad (2.38)$$

Berdasarkan persamaan yang diperoleh dari mode 1 loop 3 diketahui bahwa $V_C = V_{L1} = V_{L2} = V_{DC}$. Dengan melakukan operasi substitusi terhadap VC didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_{DC} \cdot D + \left(\frac{V_{DC}}{2} - \frac{Vo}{4} + \frac{V_{DC}}{4} - \frac{V_{DC} \cdot D}{2} + \frac{Vo \cdot D}{4} - \frac{V_{DC} \cdot D}{4} \right) = 0$$

$$V_{DC} \cdot D \left(1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \right) + V_{DC} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \right) + Vo \left(-\frac{1}{4} + \frac{D}{4} \right) = 0$$

$$V_{DC} \cdot D \left(\frac{1}{4} \right) + V_{DC} \left(\frac{3}{4} \right) - Vo \left(\frac{1}{4} \right) + Vo \cdot D \left(\frac{1}{4} \right) = 0 \quad (2.39)$$

Dengan melakukan operasi pembagian pada semua sisi ruas dengan $\frac{1}{4}$, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_{DC} \cdot D + V_{DC} \cdot 3 - Vo + Vo \cdot D = 0$$

$$V_{DC} (D + 3) + Vo (-1 + D) = 0$$

$$V_{DC}(3 + D) + Vo(-1 + D) = 0 \quad (2.40)$$

Dari persamaan 2.40 dapat diperoleh persamaan tegangan *output* (V_o). Dengan melakukan pemindahan ruas V_o ke sisi sebelah kanan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{DC}(3 + D) = Vo(1 - D)$$

$$Vo = \frac{V_{DC}(3+D)}{(1-D)} \quad (2.41)$$

Dari persamaan 2.41 diatas dapat dicari nilai *Gain* (G) atau peningkatan tegangan dari rangkaian boost converter. *Gain* dapat diperoleh dengan rumus: $Gain = V_{output} / V_{input}$. Dengan melakukan operasi distribusi matematika diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$G = \frac{Vo}{V_{DC}}$$

$$G = \frac{\frac{V_{DC}(3+D)}{(1-D)}}{V_{DC}}$$

$$G = \frac{(3+D)}{(1-D)} \quad (2.42)$$

Dari persamaan 2.42 dapat diketahui bahwa nilai tegangan keluaran rangkaian *boost converter* dengan rangkaian pengganda tegangan memiliki nilai yang lebih tinggi daripada tegangan masukannya. Hal ini sesuai dengan teori yang dijelaskan pada halaman sebelumnya.

2.3.4. Penurunan Parameter Komponen

Berdasarkan gambar 2.10 dapat diketahui bahwa rangkaian *boost converter* dengan rangkaian pengganda tegangan memiliki beberapa parameter komponen diantaranya induktor L_1 , induktor L_2 , kapasitor pentransfer tegangan C , kapasitor pada rangkaian pengganda tegangan C_1 dan C_2 , Kapasitor filter C_o dan beban resistif R . Sehingga diperlukan perhitungan secara matematis untuk menentukan parameter-parameter komponen yang digunakan sebagai bahan desain rangkaian *boost*

converter dengan rangkaian pengganda tegangan. Pada bagian ini akan dibahas tentang proses mencari parameter komponen rangkaian *boost converter* berdasarkan perhitungan. Parameter komponen pertama yang akan dicari adalah induktor L_1 .

Perhitungan komponen induktor L_1 dilakukan pada saat keadaan saklar tertutup (mode 1 = *ON*). Berdasarkan gambar 2.12 saat mode 1 loop 1, diketahui bahwa saat saklar *ON* arus mengalir melewati induktor L_1 dan sumber tegangan DC. Dengan menerapkan prinsip *Khircoff Voltage Law* (KVL) diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{L1} - V_S = 0 \quad (2.43)$$

Dengan memindahkan V_S ke sisi sebelah kanan, maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{L1} = V_S \quad (2.44)$$

V_{L1} dapat diuraikan menjadi $L_1 \cdot \frac{di_1}{dt}$, dengan melakukan operasi substitusi terhadap V_{L1} maka diperoleh persamaan baru sebagai berikut:

$$L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = V_S \quad (2.45)$$

$\frac{di_1}{dt}$ merupakan nilai perubahan arus *input* yang melewati induktor L_1 pada interval waktu t . Karena pada saat operasi ini rangkaian bekerja pada mode 1 maka interval waktu yang berlaku adalah t_{on} . di_1 merupakan besarnya nilai *ripple* atau riak arus yang melewati induktor L_1 (Δi_1) sedangkan dt merupakan fungsi interval waktu pada saat mode 1 (saklar *ON*), sehingga nilai $dt = t_{on}$. Dengan melakukan operasi substitusi terhadap persamaan 2.45 maka diperoleh persamaan baru sebagai berikut:

$$L_1 \cdot \frac{\Delta i_1}{t_{on}} = V_S \quad (2.46)$$

Δi_1 merupakan hasil perkalian dari factor *ripple* (λ) dengan arus yang mengalir pada induktor L_1 (i_l). Sedangkan t_{on} merupakan hasil perkalian

dari *duty cycle* (D) dengan periode pensaklaran (T). Dengan melakukan operasi substitusi terhadap persamaan 2.46 maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$L_1 \cdot \frac{\lambda \cdot i_1}{D \cdot T} = V_S \quad (2.47)$$

Dengan melakukan operasi distribusi terhadap persamaan 2.47 dengan memindahkan semua parameter (kecuali L_1) ke sisi sebelah kanan, maka diperoleh persamaan baru sebagai berikut:

$$L_1 = \frac{V_S \cdot D \cdot T}{\lambda \cdot i_1} \quad (2.48)$$

Nilai i_1 merupakan hasil pembagian dari daya (P) dengan tegangan *input* (V_S), nilai periode (T) merupakan hasil dari $\frac{1}{f_s}$. Nilai f_s merupakan nilai frekuensi pensaklaran. Sehingga persamaan 2.48 dapat diubah menjadi:

$$L_1 = \frac{V_S \cdot D}{\lambda \cdot \frac{P}{V_S} \cdot f_s} \quad (2.49)$$

$$L_1 = \frac{V_S^2 \cdot D}{\lambda \cdot P \cdot f_s} \quad (2.50)$$

Kedua, parameter komponen yang dihitung adalah induktor L_2 . Perhitungan komponen induktor L_2 dilakukan pada saat keadaan saklar tertutup (mode 1 = ON). Berdasarkan gambar 2.12 saat mode 1 loop 4, diketahui bahwa saat saklar ON arus mengalir melewati induktor L_2 dan sumber tegangan DC. Sesuai dengan persamaan loop 4 mode 1 diketahui bahwa $V_{DC} = V_{L2}$. Berdasarkan persamaan loop 1 sampai loop 4 saat mode 1 (saklar ON) diketahui bahwa nilai $V_{L1} = V_{L2}$. Sehingga dengan menerapkan prinsip *Khircoff Voltage Law* (KVL) diperoleh persamaan komponen $L_2 = L_1$ sebagai berikut:

$$L_2 = \frac{V_S^2 \cdot D}{\lambda \cdot P \cdot f_s} \quad (2.51)$$

Ketiga, akan dilakukan penurunan persamaan untuk menentukan persamaan komponen kapasitor pentransfer tegangan C. Perhitungan komponen kapasitor C dilakukan pada saat keadaan saklar tertutup (mode 1 = *ON*). Berdasarkan gambar 2.12 saat mode 1 loop 3, diketahui bahwa saat saklar *ON* arus mengalir melewati kapasitor C dan induktor L1. Dengan menerapkan prinsip *Khircoff Voltage Law* (KVL) diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_{L1} = V_C \quad (2.52)$$

Berdasarkan persamaan 2.13 pada loop 2 Mode 1 (saklar *ON*) dapat diketahui bahwa $V_{L1} = V_S$. Dengan melakukan operasi substitusi pada V_{L1} diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_S = V_C \quad (2.53)$$

Dari persamaan 2.53 diatas dapat diketahui bahwa nilai $V_S = V_C$. V_C merupakan nilai tegangan pada komponen kapasitor C yang dapat diuraikan ke dalam persamaan dasar sebagai berikut:

$$V_S = V_C$$

$$V = I \cdot R$$

$$\Delta V_S = i_C \cdot X_C$$

$$\lambda \cdot V_S = i_C \cdot \frac{1}{\omega_C}$$

$$\lambda \cdot V_S = i_C \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi f_s \cdot C}$$

$$V_S = \frac{P}{V_S \cdot 2 \cdot \pi f_s \cdot C \cdot \lambda}$$

$$C = \frac{P}{V_S^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \lambda} \quad (2.54)$$

Keempat, akan dilakukan penurunan persamaan untuk menentukan persamaan komponen kapasitor C_1 dan C_2 pada rangkaian pengganda tegangan. Perhitungan komponen kapasitor C_1 dan C_2 dilakukan pada saat keadaan saklar tertutup (mode 1 = ON). Berdasarkan gambar 2.12 saat mode 1 loop 5, diketahui bahwa saat saklar ON arus mengalir melewati kapasitor C_1 , Co, R, C_2 dan induktor L_2 . Karena dalam satu loop, maka besarnya arus yang mengalir pada kapasitor C_1 sama dengan arus yang mengalir pada beban. Sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$I_{C1} = I_o \quad (2.55)$$

I_{C1} merupakan arus yang mengalir ke kapasitor C_1 , sehingga dapat diturunkan ke dalam persamaan $C_1 \frac{dV_{C1}}{dt}$. Didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = I_o \quad (2.56)$$

I_o merupakan arus yang mengalir pada beban, yang dapat ketahu dari persamaan $I_o = P/V_o$ dengan melakukan proses distribusi pada persamaan 2.56 didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} &= \frac{P}{V_o} \\ C_1 \frac{\Delta V_{C1}}{t_{on}} &= \frac{P}{V_o} \\ C_1 \frac{\lambda V_{C1}}{D.T} &= \frac{P}{V_o} \\ C_1 &= \frac{P.D.T}{V_o.\lambda.V_{C1}} \\ C_1 &= \frac{P.D.T}{V_o.\lambda.(1/2(V_o - V_s))} \end{aligned} \quad (2.57)$$

Kelima, akan dilakukan penurunan persamaan untuk menentukan persamaan komponen kapasitor filter tegangan Co. Perhitungan komponen kapasitor Co dilakukan pada saat keadaan saklar tertutup (mode 1 = ON). Dimana saat mode 5 loop sisi *output* diketahui bahwa komponen kapasitor Co dan beban R berada dalam satu rangkaian tertutup. Berdasarkan gambar 2.12 saat mode 1, dengan menerapkan prinsip *Khircoff Voltage Law* (KVL) diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$V_o - V_{Co} = 0$$

$$V_o = V_{Co}$$

$$V_o = 1/Co \int_0^t i_o dt$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_o}{Co}$$

$$\frac{\Delta V_o}{t_{on}} = \frac{i_o}{Co}$$

$$\frac{\lambda.V_o}{D.T} = \frac{i_o}{Co}$$

$$\frac{\lambda.V_o}{D.T.i_o} = \frac{1}{Co}$$

$$\frac{D.i_o}{\lambda.f.s.V_o} = Co \quad (2.58)$$

Keenam, akan dilakukan penurunan persamaan untuk menentukan persamaan komponen beban resistif. Didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{V_o^2}{R} = P$$

$$\frac{V_o^2}{P} = R \quad (2.59)$$

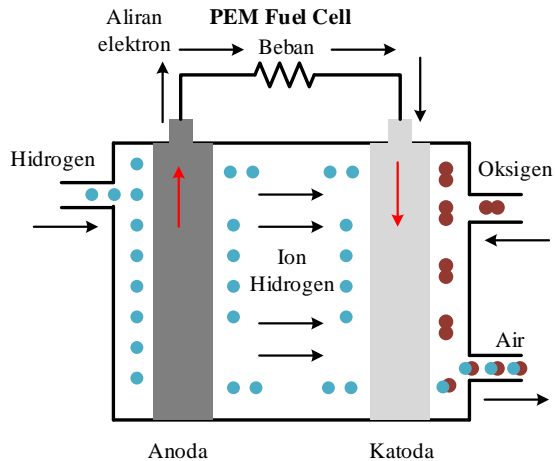
2.4 Sel Bahan Bakar atau *Fuel cell*

Fuel cell atau sel bahan bakar adalah suatu alat elektrokimia yang mampu mengkonversi energi dari hidrogen H_2 dan oksigen menjadi tenaga listrik, air dan energi panas [7]. *Fuel cell* merupakan sumber energi baru terbarukan yang bekerja pada daya rendah dan sedang [8]. *Fuel cell* merupakan energi alternatif yang ramah lingkungan dan seperti baterai, *fuel cell* memiliki elektroda positif dan negatif. Atau sering disebut anoda dan katoda. Pada elektroda inilah terjadi proses kimia yang menghasilkan tenaga listrik. Pada *fuel cell* terdapat elektrolit yang berperan sebagai pembawa muatan listrik dari satu elektroda ke elektroda yang lain. Terdapat pula katalis yang berperan untuk mempercepat reaksi kimia di elektroda.

Tidak seperti baterai yang akan habis seiring pemakaian dan perlu pengisian ulang, *full cell* sebagai sumber energi akan terus bekerja selama adanya bahan bakar yang digunakan yaitu hidrogen dan oksigen. Arus listrik dan panas yang dihasilkan *fuel cell* merupakan efek samping reaksi kimia yang terjadi pada katoda dan anoda. Pada setiap sel *fuel cell* pada umumnya menghasilkan tegangan sekitar 0.7V sampai 1.2V [9]. Sesuai gambar 2.14 secara sederhana satu unit *fuel cell* pasti memiliki katoda, anoda, elektrolit dan katalis.

Anoda atau kutub elektroda negatif *fuel cell*, merupakan elektroda yang akan mengalirkan elektron yang terlepas dari molekul hidrogen dan akan disebarkan ke seluruh permukaan katalis. Katoda atau kutub elektroda positif *fuel cell*, merupakan elektroda yang berfungsi mengalirkan oksigen ke seluruh permukaan katalis. Sehingga elektron-elektron yang mengalir dapat bergabung dengan ion hidrogen dan oksigen dalam proses pembentukan air yang menghasilkan tenaga listrik dan panas.

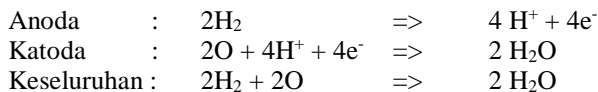
Katalis berperan untuk mempercepat proses reaksi kimia pembentukan air tanpa mengganggu keberlangsungan proses tersebut. Katalis yang sering digunakan berasal dari lembaran kertas karbon yang diberi lapisan tipis bubuk platina. Secara umum permukaan katalis dibuat berpori dan kasar agar seluruh permukaan platina dapat dicapai oleh hidrogen dan oksigen. Lapisan platina katalis biasanya berbatasan secara langsung dengan membrane penukar ion positif PEM.



Gambar 2.10 Gambaran sederhana *fuel cell*

Elektrolit yang digunakan (pada PEMFC) merupakan proton exchange membrane/membrane penukar proton. Elektrolit PEM berbentuk seperti plastik pembungkus yang hanya mengalirkan ion positif, sehingga ion negatif akan tertahan.

Pada satu unit *fuel cell* terjadi reaksi kimia yang terjadi di anoda dan katoda. Yang dapat diuraikan sebagai berikut:



Hasil samping reaksi kimia ini adalah aliran elektron yang menghasilkan arus listrik serta energi panas.

Ada beberapa jenis *fuel cell* yang ditentukan berdasarkan material yang digunakan sebagai bahan elektrolit, diantaranya sebagai berikut:

1. Proton Exchange Membrane (PEM)

PEM sering disebut juga sebagai proton elektrolit membran. PEM memiliki membran plastic tipis yang dilapisi platina pada kedua sisinya. PEM memiliki harga yang relatif murah, mampu beroperasi pada

suhu rendah dan memiliki kepadatan energi yang tinggi sehingga cocok digunakan untuk alat listrik, telepon seluler dan kamera video.

2. *Alkaline Fuel Cell (AFC)*

AFC banyak digunakan pada program luar angkasa, power station pembangkit listrik atau energi panas serta untuk kendaraan. AFC memiliki kepekaan yang tinggi terhadap zat-zat tertentu seperti CO₂, CO, korosi dan hasil oksidasi. AFC juga memiliki efisiensi yang tinggi sampai 70%. Namun secara ekonomis penerapan AFC membutuhkan biaya yang besar.

3. *Regenerative Fuel Cell*

Regenerative *fuel cell* merupakan *fuel cell* jenis terbaru yang menggunakan elektrolisa tenaga sel surya. Hidrogen dan oksigen yang digunakan sebagai bahan bakar *fuel cell* diperoleh dari proses penguraian air. Yang kemudian mengalami reaksi kimia yang menghasilkan tenaga listrik, energi panas dan air yang digunakan untuk proses selanjutnya.

Fuel cell yang dijadikan sumber dc pada penelitian ini yaitu *fuel cell* dengan merk Horizon (H-1000_UM_V4.4_EN), spesifikasi dari *fuel cell* tersebut ditunjukkan pada tabel 2.2.

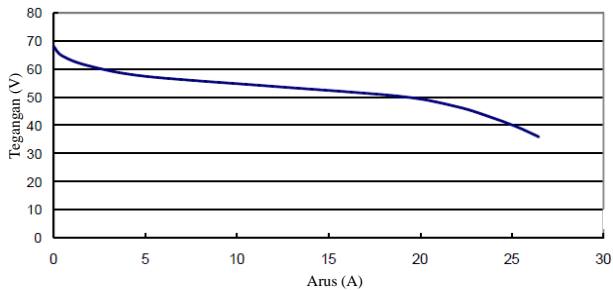
Tabel 2.2 Spesifikasi *fuel cell* Horizon 1000

Type	PEM
Number of cells	72
Rated power	1000W
Performance	43,2 V @ 24 A
H2 supply valve voltage	12 V
Purging valve voltage	12 V
Blower voltage	12 V
Reactants	Hydrogen and air
External temperature	5 to 30°C
Max stack temperature	65°C
H2 pressure	0,45 – 0,55 bar
Hydrogen purity	>99,995% dry H2
Humidification	Self-humidified
Cooling	Air
Weight	4500 grams

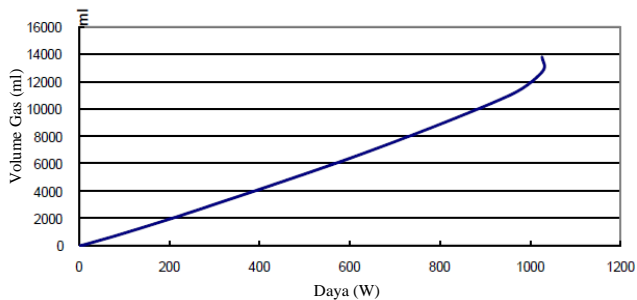
Tabel 2.2 Spesifikasi Horizon 1000 *fuel cell* (lanjutan)

Controller	400 grams
Dimension	21,5 x 12,5 x 30cm
Flow rate at max output	14 l/min
Start up time	< 30s at ambient temperature
Efficiency of stack	40% @43,2V
Low voltage shut down	36 V
Over current shut down	30 A
Over temperature shut down	65 °C
External power supply	12-14 V, 5A~8A

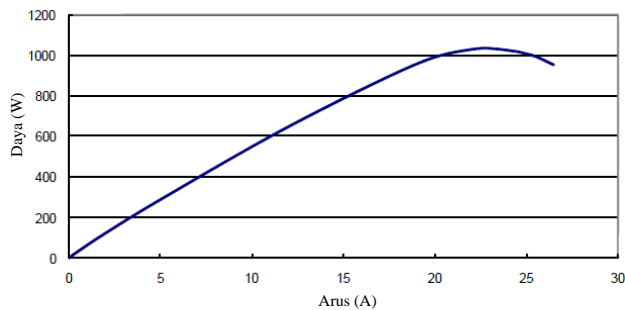
Modul *fuel cell* horizon 1000 yang digunakan merupakan modul yang terdapat di Laboratorium Konversi Energi Listrik. Karakteristik dari *fuel cell* horizon 1000 berdasarkan buku manual ditunjukkan pada grafik dibawah ini:



Gambar 2.11 Karakteristik *fuel cell*: V dan I



Gambar 2.12 Karakteristik *fuel cell*: Vol.Gas dan P



Gambar 2.13 Karakteristik *fuel cell*: P dan I

Fuel cell horizon 1000 memiliki performa maksimum 1000 watt dengan tegangan keluaran sebesar 43,2 V dan arus keluaran sebesar 24 A. Pada saat pengoperasian *fuel cell* ini membutuhkan supply luar sebesar 12-14 V yang mampu mengalirkan arus hingga 5-8 A. Gas hidrogen yang digunakan sebagai bahan bakar *fuel cell* merupakan gas hidrogen jenis UHP (*Ultra High Purity*) dengan kemurnian mencapai 99.99%. Hal ini digunakan untuk menjaga kondisi *fuel cell* agar tetap berfungsi dengan baik sehingga dihasilkan efisiensi yang tinggi. Tekanan gas hidrogen yang keluar dari tabung hidrogen diatur pada tekanan 0,45-0,55 bar.

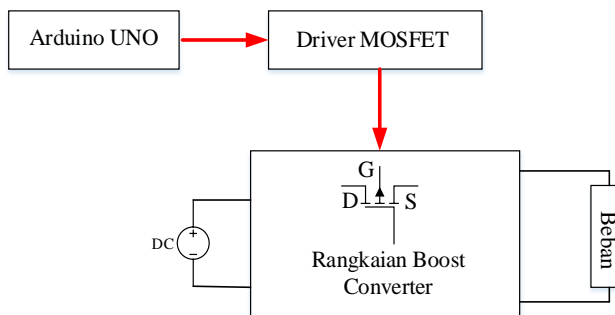
Fuel cell horizon 1000 memiliki sistem proteksi diri terhadap tegangan terendah yang mampu dihasilkan sebesar 36 V, proteksi diri terhadap arus maksimum yang mampu disupply sebesar 30 A dan proteksi diri terhadap suhu maksimum saat *fuel cell* bekerja sebesar 65 °C. Jika dalam pengoperasian melebihi batas-batas tersebut, maka modul *fuel cell* secara otomatis beralih ke mode *switch off*.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 3

DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI

Pada bab 3 ini akan dibahas mengenai proses desain, simulasi, dan implementasi *high voltage gain dc-dc boost converter* untuk aplikasi *fuel cell*. Proses menentukan desain HVGBC dilakukan dengan cara menghitung dan menentukan nilai dari semua parameter komponen yang digunakan dalam proses implementasi alat sesuai dengan perhitungan yang telah diturunkan pada bab 2. Setelah mengetahui nilai dari semua parameter, kemudian dilanjutkan dengan proses simulasi rangkaian. Simulasi dilakukan menggunakan PSIM. Simulasi digunakan untuk mengetahui apakah rangkaian *boost converter* berjalan dengan baik dan sesuai dengan desain yang telah dikerjakan. Hasil yang didapatkan dari proses simulasi alat digunakan sebagai data primer dalam implementasi alat. Secara umum diagram blok rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* secara sederhana dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram blok rangkaian *High Voltage Gain DC-DC Boost Converter*

3.1 Desain Parameter Elektris

Proses desain awal yaitu dengan menentukan parameter-parameter listrik yang akan digunakan pada rangkaian *boost converter*. Parameter-parameter listrik yang ditentukan diantaranya Tegangan *input*, tegangan *output*, frekuensi *switching*, *ripple* arus, *ripple* tegangan

dan daya putput. Parameter-parameter tersebut berguna sebagai acuan dalam menentukan nilai induktor, kapasitor dan beban. Penentuan parameter-parameter tersebut dengan mempertimbangkan ketersediaan alat pada laboratorium konversi energi dan komponen yang tersedia di pasaran. Parameter-parameter yang digunakan sebagai acuan dalam merancang HVGBC ditunjukkan pada tabel 3.1. sebagai berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi parameter awal desain HVGBC

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1.	Tegangan <i>Input</i>	36	Volt
2.	Tegangan <i>Output</i>	185	Volt
3.	Frekuensi <i>Switching</i>	50	kHz
4.	Ripple Arus	2,5	%
5.	Ripple Tegangan	1	%
6.	Daya <i>Output</i>	50	Watt

Pada desain ini tegangan *input* ditentukan sebesar 36 volt. Tegangan *output* ditentukan sebesar 185 volt, karena tegangan *output* konverter akan digunakan sebagai sumber beban lampu yang akan digunakan dalam pengujian. Daya keluaran ditentukan sebesar 50 watt. Ripple arus masukan yang melewati induktor ditentukan sebesar 2.5% dan ripple tegangan keluaran ditentukan sebesar 1%. Berdasarkan tegangan *input* dan tegangan *output* yang telah ditentukan pada rangkain konverter, dapat diketahui nilai rasio konversi energi atau nilai *gain* yang digunakan.

3.2 Frekuensi dan *Duty cycle*

Frekuensi penyaklaran yang digunakan merupakan frekuensi tinggi. Hal ini dilakukan dengan mempertimbangkan kinerja sistem dan komponen penyaklaran yang akan digunakan. Sinyal penyaklaran yang digunakan merupakan sinyal PWM. Hal ini dilakukan karena sinyal PWM memiliki kemudahan dalam pengaturan frekuensi penyaklaran dan *duty cycle* yang digunakan.

Sesuai dengan persamaan yang telah diuraikan pada bab 2, nilai *duty cycle* dapat dicari sebagai berikut:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{(3+D)}{(1-D)}$$

$$\frac{185}{36} = \frac{(3 + D)}{(1 - D)}$$

$$185(1 - D) = 36(3 + D)$$

$$185 - 185D = 108 + 36D$$

$$185 - 108 = 185D + 36D$$

$$77 = 221D$$

$$D = \frac{77}{221}$$

$$D = 0.348$$

Nilai *duty cycle* yang digunakan pada desain rangkaian *boost converter* sebesar 34.8% dengan frekuensi penyaklaran sebesar 50 KHz. Kedua parameter ini akan digunakan sebagai acuan dalam pembuatan program di arduino sehingga mampu menghasilkan sinyal PWM berbentuk persegi sesuai yang diharapkan. Gelombang ini digunakan sebagai gelombang masukan pada komponen penyaklaran.

3.3 Parameter Induktor

Terdapat 2 buah induktor yang digunakan pada desain *high voltage gain boost converter* yaitu L_1 dan L_2 . Untuk mencari nilai dari masing-masing induktor dapat digunakan persamaan yang telah diuraikan pada bab 2. Pertama, induktor L_1 dapat ditentukan nilainya dengan persamaan 2.51, sebagai berikut:

$$L_1 = \frac{V_s^2 \cdot D}{\lambda \cdot P \cdot f_s}$$

V_s = Tegangan masukan (Volt)

D = *Duty cycle* (%)

λ = Faktor ripple (%)

P = Daya keluaran (Watt)

f_s = Frekuensi penyaklaran (Hz)

Faktor ripple yang digunakan sebesar 2,5%. Dengan melakukan operasi substitusi pada persamaan diatas, maka diperoleh nilai L_1 sebagai berikut:

$$L_1 = \frac{36^2 \cdot 0,348}{0,025 \cdot 50 \cdot 50000}$$

$$L_1 = 0,00722 \text{ H}$$

$$L_1 = 7,22 \text{ mH}$$

Nilai induktor L_2 dapat ditentukan dengan persamaan:

$$L_2 = \frac{V_s^2 \cdot D}{\lambda \cdot P \cdot f_s}$$

- V_s = Tegangan masukan (Volt)
- D = Duty cycle (%)
- λ = Faktor ripple (%)
- P = Daya keluaran (Watt)
- f_s = Frekuensi penyaklaran (Hz)

Faktor ripple yang digunakan pada desain induktor L_2 sebesar 2,5%. Dengan menerapkan proses substitusi parameter pada persamaan diatas, didapatkan nilai L_2 sebagai berikut:

$$L_2 = \frac{36^2 \cdot 0,348}{0,025 \cdot 50 \cdot 50000}$$

$$L_2 = 0,00722 \text{ H}$$

$$L_2 = 7,22 \text{ mH}$$

Sesuai persamaan 2.51 yang telah diuraikan pada bab 2, dapat diketahui bahwa induktor L_1 dan L_2 memiliki nilai yang sama.

3.4 Parameter Kapasitor

Pada rangkain HVGBC terdapat 4 kapasitor yang digunakan yaitu kapasitor C sebagai kapasitor pentransfer tegangan, kapasitor C_1 dan C_2 yang berperan pada rangkaian pelipatganda tegangan dan kapasitor C_o yang berperan sebagai kapasitor filter tegangan keluaran. Sesuai persamaan 2.54 nilai kapasitor C dapat ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$C = \frac{P}{Vs^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot fs \cdot \lambda}$$

Nilai factor ripple tegangan yang digunakan pada persamaan diatas sebesar 0.065%. Dengan menerapkan proses substitusi parameter pada persamaan diatas, didapatkan nilai C sebagai berikut:

$$C = \frac{50}{36^2 \cdot 2.22 / 7.50000.0,00065}$$

$$C = 458,64 \mu F$$

Nilai kapasitor yang digunakan pada rangkain *boost converter* disesuaikan dengan nilai kapasitor yang terdapat di pasaran. Nilai kapasitor di pasaran yang mendekati dengan nilai kapasitor hasil perhitungan yaitu sebesar 470 μF . Nilai kapasitor C_1 dan C_2 pada rangkaian pelipatganda tegangan dibuat sama dengan kapasitor C. Hal ini dilakukan karena pengamatan yang dilakukan pada gelombang tegangan keluaran yang dipengaruhi oleh nilai kapasitor C_o . Sehingga nilai C_1 dan C_2 didesain sama dengan kapasitor C dengan pertimbangan nilai kapasitansi dan rating kapasitor C_1 dan C_2 telah mencukupi dan mampu melaksanakan fungsi sebagai rangkaian pelipatganda tegangan. Sehingga nilai tegangan keluaran yang dihasilkan rangkaian sesuai dengan tegangan keluaran hasil desain dan simulasi.

Nilai kapasitor filter tegangan (C_o) pada sisi *output* dapat ditentukan dengan persamaan:

$$C_o = \frac{D \cdot i_o}{\lambda \cdot fs \cdot Vo}$$

Nilai factor ripple tegangan yang digunakan pada persamaan diatas sebesar 1%. Nilai I_o merupakan nilai arus pada sisi *output* yang dapat dicari dari hasil pembagian daya (P) dengan tegangan *output* (V_o). Dengan menerapkan proses substitusi parameter pada persamaan diatas, didapatkan nilai C_o sebagai berikut:

$$C_o = \frac{D \cdot P}{\lambda \cdot f_s \cdot V_o^2}$$

$$C_o = \frac{0,348.50}{0.01.50000.185^2}$$

$$C_o = 1018 \text{ nF}$$

Nilai kapasitor yang digunakan pada rangkain *boost converter* disesuaikan dengan nilai kapasitor yang terdapat di pasaran. Nilai kapasitor di pasaran yang mendekati dengan nilai kapasitor hasil perhitungan yaitu sebesar 1 uF.

3.5 Parameter Beban

Nilai parameter beban yang digunakan dapat ditentukan berdasarkan nilai tegangan keluaran dan daya keluaran yang telah di desain sebelumnya yaitu didesain untuk daya 50 Watt dan tegangan 185 Volt. Nilai parameter dapat diperhitungkan dengan persamaan 3.1 berikut:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.1)$$

$$R = \frac{V^2}{P}$$

$$R = \frac{185^2}{50}$$

$$R = 684,5 \Omega$$

Beban yang digunakan merupakan beban yang bersifat resisitif. Selain digunakan sebagai beban, rangkaian beban resistif juga digunakan sebagai rangkaian untuk menghilangkan tegangan yang terdapat pada

kapasitor sehingga tidak menimbulkan bahaya jika tersentuh oleh manusia. Tabel 3.2 menunjukkan nilai parameter komponen rangkaian HVGBC antara hasil desain, simulasi dan implementasi.

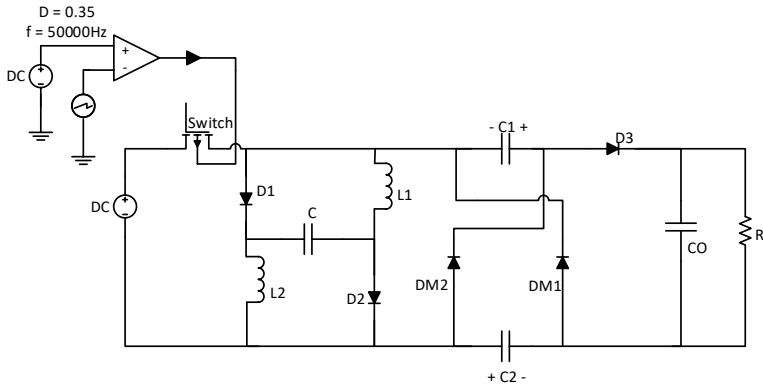
Tabel 3.2 Nilai parameter komponen rangkaian HVGBC

No.	Parameter	Desain	Simulasi	Implementasi
1.	Tegangan <i>Input</i> (V)	36	36	36
2.	Tegangan <i>Output</i> (V)	185	185	162
3.	Frekuensi <i>Switching</i> (kHz)	50	50	50
4.	Ripple Arus (%)	2,5	3,6	22,8
5.	Ripple Tegangan (%)	1	1,87	2,46
6.	Daya <i>Output</i> (Watt)	50	50	48,6
7.	Induktor L1 (mH)	7,2	7,2	8,1
8.	Induktor L2 (mH)	7,2	7,2	8,1
9.	Kapasitor C,C1,C2 (uF)	458,64	458,64	470
10.	Kapasitor Filter Co (uF)	1,018	1,018	1
11.	Beban (Ohm)	684,5	684,5	685

3.6 Simulasi Rangkaian *High Voltage Gain DC-DC Boost converter* (HVGBC)

Simulasi rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* dilakukan dengan menggunakan software PSIM. Simulasi dilakukan pada saat kondisi steady state dan komponen-komponen sistem yang digunakan dalam simulasi merupakan komponen yang ideal. Tujuan dari simulasi adalah untuk mengetahui apakah desain rangkaian *boost converter* tersebut mampu beroperasi dan menjalankan fungsinya dengan baik atau tidak. Nilai parameter-parameter hasil desain yang digunakan pada tahap simulasi yaitu nilai tegangan *input*, frekuensi pensaklran, *ripple* arus, *ripple* tegangan keluaran, nilai induktor L₁ dan L₂, nilai kapasitor C, kapasitor C₁, kapasitor C₂, kapasitor Co dan nilai beban R yang diharapkan mampu menghasilkan tegangan keluaran sebesar 185 volt.

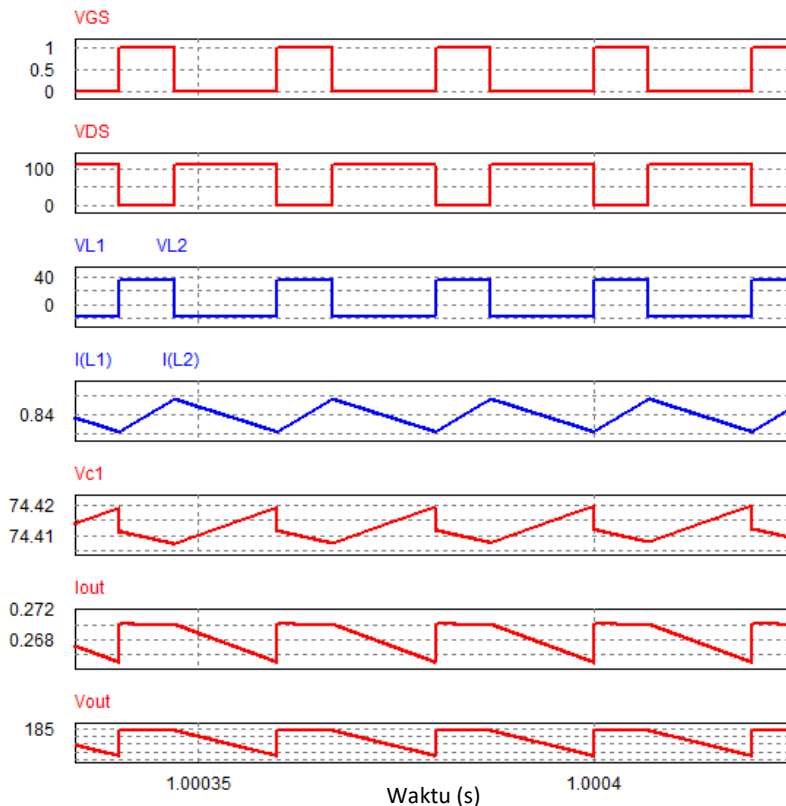
Tegangan masukan pada saat simulasi dibuat konstan sebesar 36 volt dengan *duty cycle* yang diterapkan sebesar 35%. Nilai-nilai parameter lainnya disesuaikan dengan hasil desain yang telah dikerjakan. Simulasi rangkaian *boost converter* dengan rangkaian pelipatganda tegangan dilakukan dengan skema seperti berikut:



Gambar 3.2 Simulasi *High Voltage Gain DC-DC Boost Converter* dengan rangkaian pelipatganda tegangan

Pada simulasi rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* akan diamati beberapa bentuk gelombang parameter yang digunakan yaitu gelombang tegangan pensaklaran pada sisi *gate-source* (V_{GS}) dan *drain-source* (V_{DS}), tegangan induktor L_1 dan L_2 (V_{L1} dan V_{L2}), arus induktor L_1 dan L_2 (I_{L1} dan I_{L2}), tegangan kapasitor C_1 (V_{C1}), arus *output* pada beban R (I_o) dan tegangan *output* pada beban R (V_o). Parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi merupakan komponen ideal, termasuk saklar MOSFET dan dioda.

Gambar 3.3 dibawah ini merupakan gambar karakteristik bentuk gelombang tegangan *gate-source* (V_{GS}), tegangan *drain-source* (V_{DS}), tegangan induktor L_1 (V_{L1}), tegangan induktor L_2 (V_{L2}), arus induktor L_1 (I_{L1}), arus induktor L_2 (I_{L2}), tegangan kapasitor C_1 (V_{C1}), arus *output* (I_o), tegangan *output* (V_o). Data hasil simulasi ini akan digunakan sebagai referensi dari gelombang hasil implementasi rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter*. Sehingga dapat dianalisis kesesuaian data hasil implementasi dengan data hasil simulasi. Berdasarkan bentuk gelombang pada gambar 3.3, dapat dilakukan analisis pada sistem rangkaian *boost converter* pada saat saklar *on* dan *off*.

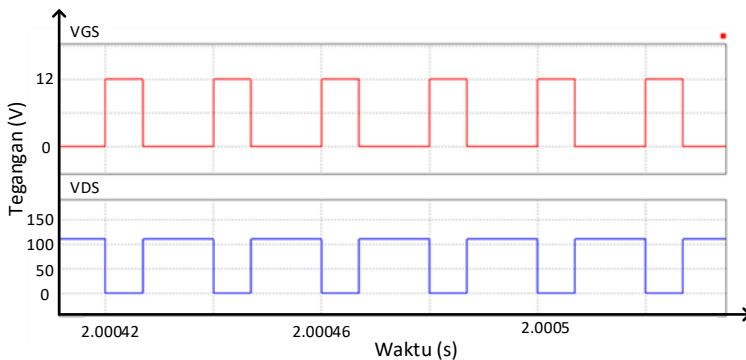


Gambar 3.3 Bentuk gelombang arus dan tegangan rangkaian HVGBC. (a) gelombang V_{GS} , (b) gelombang V_{DS} , (c) gelombang V_{L1} dan V_{L2} , (d) gelombang I_{L1} dan I_{L2} . (e) gelombang V_{C1} (f) gelombang I_{out} (g) gelombang V_{out} .

Pada saat saklar on, maka gelombang V_{GS} akan aktif dan gelombang V_{DS} akan mati. Pada kondisi saat ini, induktor L_1 , L_2 dan kapasitor C akan charging dan mengalami pengisian muatan yang berasal dari sumber tegangan dc. Hal ini selaras dengan bentuk gelombang tegangan dan arus induktor L_1 dan L_2 yang meningkat saat V_{GS} aktif. Kapasitor C_1 mengalami proses *discharging* dan mengalirkan energi ke kapasitor filter C_o dan beban resistif R .

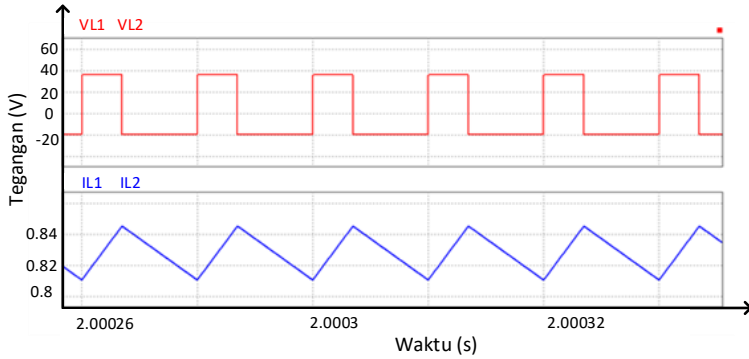
Pada saat saklar *off*, maka gelombang V_{GS} akan mati dan gelombang V_{DS} akan aktif. Pada kondisi saat ini, induktor L_1, L_2 dan kapasitor C mengalami *discharging* atau pengosongan muatan dan mengisi muatan kapasitor C_1 dan C_2 . Hal ini selaras dengan bentuk gelombang tegangan dan arus induktor L_1 dan L_2 yang mengalami penurunan selama V_{GS} mati. Dan gelombang tegangan kapasitor C_1 mengalami peningkatan selama V_{GS} mati.

Hasil simulasi tegangan rangkaian bagian penyaklaran pada sisi *drain-source* (V_{DS}) dan *gate-source* (V_{GS}) ditunjukkan pada gambar 3.4



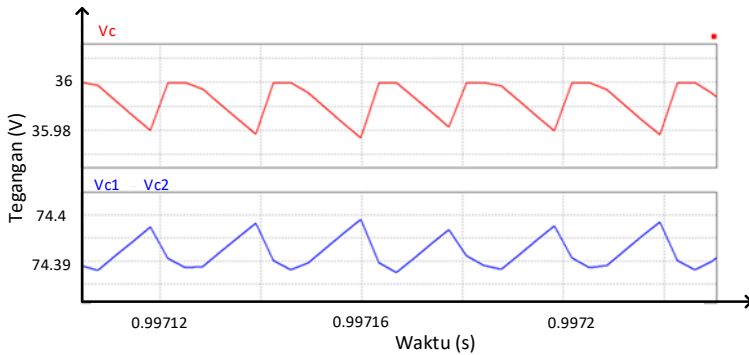
Gambar 3.4 Bentuk gelombang tegangan pada komponen penyaklaran sisi *drain-source* dan *gate-source* (V_{DS} dan V_{GS})

Hasil simulasi tegangan dan arus rangkaian bagian induktor ditunjukkan pada gambar 3.5. Dari data gelombang tegangan dan arus induktor dibawah ini, diketahui bahwa arus induktor 1 dan induktor 2 (I_{L1} dan I_{L2}) memiliki nilai dan bentuk yang identik. Sehingga bentuk gelombang induktor 1 dan 2 bertumpuk secara sempurna. Nilai induktansi kedua induktor dalam simulasi dibuat sama yaitu 7.22 mH. Dari data simulasi diketahui bahwa arus yang mengalir pada belitan induktor tidak lebih dari 0.85 A. Dan tegangan puncak tertinggi induktor 1 dan 2 sebesar 36 V.



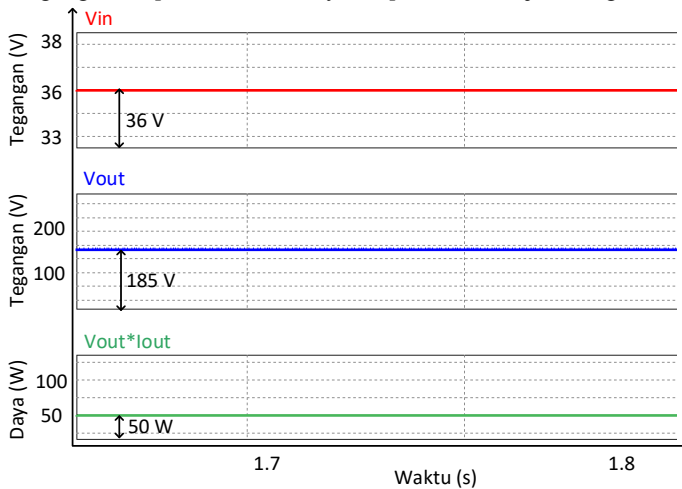
Gambar 3.5 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada komponen induktor L_1 dan L_2

Hasil simulasi tegangan rangkaian bagian kapasitor C_1 dan C_2 ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Bentuk gelombang tegangan pada komponen kapasitor C_1 dan C_2

Hasil simulasi rangkaian HVGBC pada bagian tegangan *input* (V_i), tegangan *output* (V_o) dan daya *output* (P) ditunjukkan gambar 3.7.

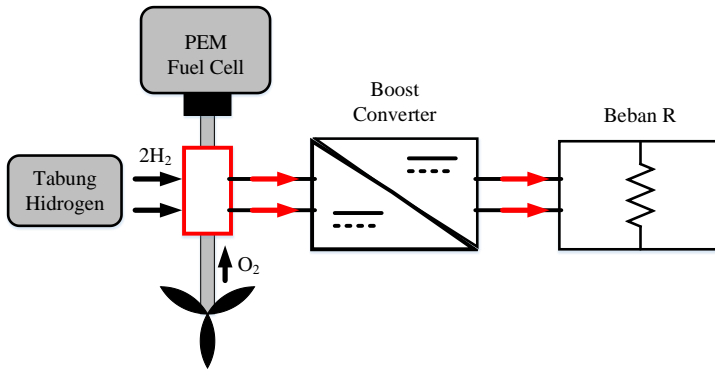


Gambar 3.7 Bentuk gelombang tegangan *input*, tegangan *output* dan daya *output*

Gambar 3.7 diatas menunjukkan hasil simulasi desain HVGBC pada sisi tegangan masukan, tegangan keluaran dan daya keluaran. Berdasarkan hasil simulasi, dapat diketahui bahwa desain HVGBC dapat beroperasi dengan baik dan mampu menghasilkan tegangan keluaran sebesar 185 V untuk daya 50 Watt. Tegangan keluaran *boost converter* ini nantinya akan digunakan sebagai sumber dan terhubung ke beban.

3.7 Implementasi Rangkaian *High Voltage Gain DC-DC Boost Converter* (HVGBC)

Setelah melakukan proses simulasi desain HVGBC dengan software PSIM dan dipatkan hasil yang sesuai teori, maka selanjutnya adalah tahap implementasi rangkaian HVGBC. Pada subbab ini akan dibahas mengenai implementasi *high voltage gain dc-dc boost converter* berdasarkan desain rancangan yang telah dikerjakan. Implementasi berdasarkan desain *boost converter* dilakukan dengan memperhatikan ketersediaan nilai komponen yang ada di pasaran. Secara sederhana gambar diagram blok untuk implementasi HVGBC dapat ditunjukkan pada gambar 3.8 sebagai berikut:



Gambar 3.8 Diagram blok implementasi rangkaian HVGBC

Dalam implementasi rangkaian *boost converter* ada berbagai hal yang harus dipersiapkan langkah pertama yang dikerjakan adalah membuat sinyal *input* penyalakan berupa sinyal *pulse width modulation* (PWM) yang dibuat dengan pemrograman arduino. MOSFET merupakan suatu komponen semikonduktor yang berperan untuk penyalakan secara otomatis dengan mengatur *duty cycle* pada program arduino. Driver MOSFET digunakan sebagai penghubung antara arduino dengan MOSFET dan digunakan untuk membantu MOSFET dalam proses penyalakan. Arduino yang digunakan dalam pemrograman adalah arduino UNO. Tegangan masukan arduino sebesar 12 VDC. Program arduino diatur sedemikian rupa sehingga mampu menghasilkan keluaran berupa sinyal PWM dengan *duty cycle* sebesar 0,348 dengan frekuensi sinyal sebesar 50 KHz.

Langkah kedua adalah penentuan nilai kapasitor yang digunakan. Sebelumnya telah dilakukan desain nilai kapasitansi kapasitor yang akan digunakan. Namun dalam tahap implementasi, nilai kapasitor yang digunakan disesuaikan dengan ketersediaan nilai kapasitor yang ada di pasaran. Untuk kapasitor pentransfer tegangan (C_1 dan C_2) digunakan kapasitor sebesar 470uF dengan tegangan tahanan maksimal sebesar 250 Volt. Untuk kapasitor filter tegangan *output* digunakan kapasitor sebesar 1uF dengan tegangan tahanan maksimal sebesar 400 Volt.

Langkah ketiga adalah pembuatan induktor yang digunakan dalam implementasi HVGBC. Nilai induktansi induktor L_1 dan L_2 telah dirumuskan pada subbab sebelumnya. Induktor L_1 dan L_2 yang digunakan

adalah ferrite tipe E65 N27. Spesifikasi dari ferrite E65 N27 dapat diketahui pada table 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3.3 *Datasheet* inti induktor (L_1 dan L_2)

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Inductance Factor	AL	7200	nH
Effective Length	le	147	mm
Effective Area	Ae	5.35	cm ²
Effective Permeability	ui	1570	
Saturation Magnetization	Bs	320	mT

Tabel 3.3 merupakan data yang digunakan untuk menentukan jumlah belitan induktor yang digunakan. Persamaan untuk menentukan jumlah belitan induktor yang digunakan yaitu:

$$L = AL \cdot N^2 \quad (3.2)$$

L = Nilai induktansi induktor (H)

AL = *Inductance Factor* (nH)

N = Jumlah belitan

Nilai induktansi L_1 dan L_2 sebesar 7.2 mH. Nilai faktor induktansi (AL) sesuai tabel 3.1 sebesar 7200 nH. Sehingga sesuai persamaan 3.2 dapat dicari jumlah belitan induktor yang digunakan yaitu:

$$7,2 \cdot 10^{-3} = 7200 \cdot 10^{-9} \cdot N^2$$

$$N^2 = 7,2 \cdot 10^{-3} / 7200 \cdot 10^{-9}$$

$$N^2 = 1000$$

$$N = 31,6$$

Jumlah belitan pada induktor yang harus digunakan adalah 32 lilitan. Untuk menentukan kawat *email* yang digunakan sebagai belitan pada implementasi induktor, digunakan tabel kawat AWG yang berisi tentang ukuran diameter kawat dan kemampuan hantaran arus untuk setiap jenisnya. Kawat tembaga yang digunakan sebagai belitan

merupakan kawat AWG dengan diameter 0.3mm yang dipilin sebanyak 7 kali. Kawat didesain sedemikian rupa agar mampu menahan arus sebesar 11 A. Kemampuan hantaran arus kawat belitan yang dibuat merupakan hal yang sangat penting. Apabila arus yang melewati kawat melebihi dari batas kemampuan hantaran arusnya, maka akan terjadi kerusakan pada belitan induktor. Induktor L_1 dan L_2 yang digunakan berasal dari jenis yang sama yaitu jenis ferrite e65 dengan jenis bahan inti n27. Sehingga kedua induktor memiliki spesifikasi yang sama dan perhitungan jumlah belitan induktor yang sama pula. Yaitu sesuai dengan perhitungan berdasarkan persamaan 2.51.

Antara desain dan implementasi terdapat beberapa perbedaan yaitu pada komponen yang digunakan. Hal ini terjadi karena pada saat simulasi, semua komponen dianggap ideal. Sedangkan berdasarkan fakta tidak ada komponen yang ideal karena terdapat rugi daya pada komponen yang digunakan.

Langkah keempat yaitu penentuan jenis dioda, MOSFET dan driver MOSFET yang digunakan. Pada desain awal dioda yang digunakan merupakan dioda ideal. Namun dalam kondisi aktual tidak sembarang dioda bisa digunakan. Diperlukan spesifikasi dioda yang mampu bekerja pada frekuensi dan tegangan yang tinggi. Jenis dioda yang digunakan adalah dioda MUR 1560. Dioda jenis ini memiliki kemampuan *dc blocking voltage* hingga 600 V dan mampu menghantarkan arus hingga 15 A. MUR 1560 merupakan salah satu jenis *ultrafast recovery diode* yang memiliki kemampuan *reverse recovery time* sebesar 50 ns. Dan mampu bekerja pada frekuensi hingga 20 MHz.

Rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* menggunakan satu buah MOSFET. Saklar MOSFET yang digunakan adalah jenis IRFP 4332 yang cocok digunakan untuk *fast switching* karna memiliki *fall times* dan *rise times* yang singkat. IRFP 4332 memiliki kemampuan hantaran arus hingga 57 A dan mampu menahan beda tegangan pada sisi *drain-source* (V_{DS}) hingga 300 V. Tegangan maksimum yang diberikan pada sisi *gate-source* (V_{GS}) sebesar 30 V. Penentuan tegangan mosfet dapat diperoleh dengan menerapkan rumus *voltage stress* pada MOSFET [6].

$$V_{DS} = V_{DC} - V_{L1} + V_C - V_{L2}$$

$$V_{DS} = V_{DC} + V_{L1} + V_C + V_{L2} \quad (3.3)$$

Sesuai persamaan 2.28 saat mode 2 (saklar *OFF*), dapat diketahui bahwa $V_{L1}=V_{L2}=V_L$. Nilai V_L dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_L = \frac{(V_C - V_{C1})}{2}$$

$$V_L = \frac{(V_C - (\frac{V_O - V_{dc}}{2}))}{2}$$

$$V_L = \frac{(36 - (\frac{185 - 36}{2}))}{2}$$

$$V_L = \frac{(36 - (\frac{149}{2}))}{2}$$

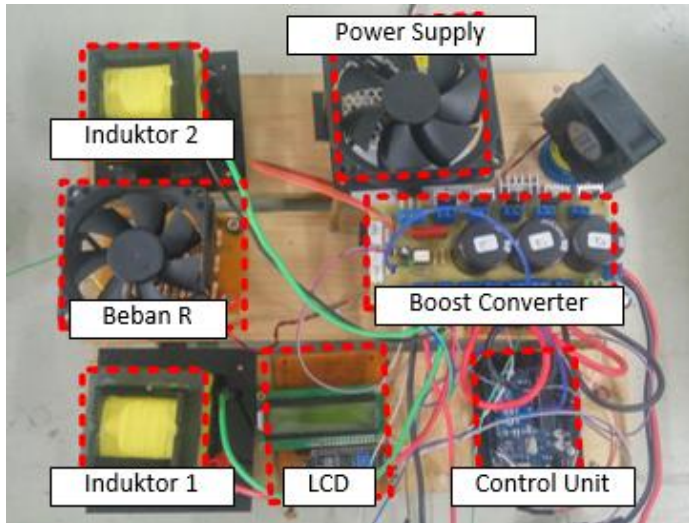
$$V_L = -19.25 \text{ Volt}$$

Substitusi nilai V_L ke persamaan V_{DS} diatas, diperoleh perhitungan sebagai berikut:

$$V_{DS} = 36 - (-19.25) + 36 - (-19.25)$$

$$V_{DS} = 110.5 \text{ Volt}$$

Besar tegangan dan arus yang melewati MOSFET pada sisi *drain-source* masih dibawah dari spesifikasi maksimum IRFP 4332. Sehingga MOSFET IRFP 4332 mampu digunakan pada implementasi sesuai desain yang telah dikerjakan. Pada rangkaian *driver* MOSFET digunakan *optocoupler* jenis FOD3182 yang mampu bekerja hingga frekuensi 250KHz. Rangkaian *driver* MOSFET disupply dengan sumber tegangan DC sebesar 12 Volt pada kaki ke 5 dan 8. Dan diberi masukan sinyal PWM pada kaki ke 2 dan 3. Hasil keluaran *optocoupler* FOD3182 terletak pada kaki ke 6 dan 7. Implementasi HVGBC ditunjukkan pada gambar 3.9 sebagai berikut:



Gambar 3.9 Implementasi HVGBC

Rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* dengan rangkaian *voltage multiplier* disupply dengan sumber tegangan dc 36 volt pada rangkaian *boost converter*, 12 volt pada rangkaian driver MOSFET dan 5 volt pada arduino UNO. Pengujian rangkaian HVGBC dilakukan dalam skala laboratorium dengan memperhatikan ketersediaan alat yang digunakan.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

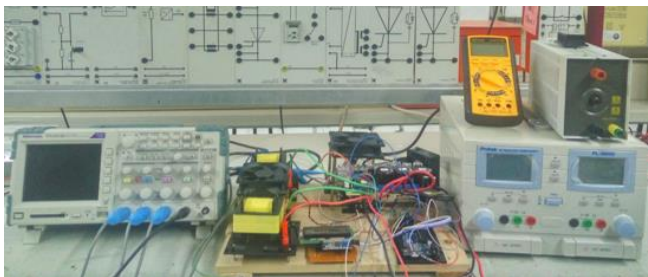
BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Pada bab 4 ini akan dibahas mengenai pengujian dan analisis data hasil pengujian dari implementasi *high voltage gain dc-dc boost converter* dengan rangkaian pengganda tegangan untuk aplikasi *fuel cell*. Pengujian yang telah dilakukan meliputi pengujian sinyal PWM dan pensakelaran, pengujian arus dan tegangan pada induktor, pengujian tegangan pada dioda, pengujian rasio konversi, pengujian efisiensi, pengujian menggunakan modul *fuel cell horizon 1000* sebagai sumber masukan konverter. Pengujian dilakukan menggunakan peralatan yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi Listrik.

4.1 Alat Pengujian

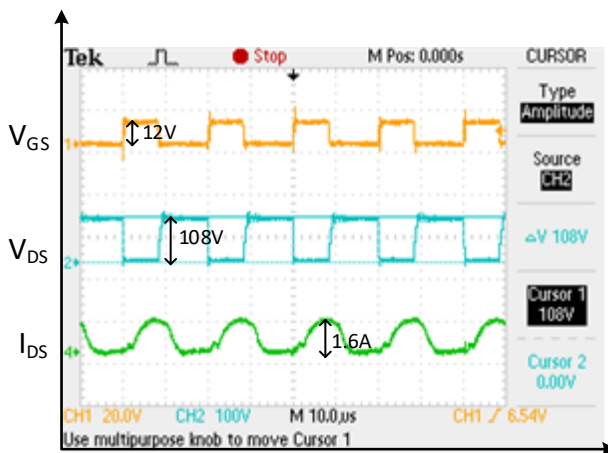
Pengujian implementasi *high voltage gain dc-dc boost converter* dengan rangkaian pengganda tegangan menggunakan peralatan skala laboratorium. Sumber tegangan DC yang digunakan dalam pengujian dan pengambilan data merupakan sumber DC variable. Sumber tegangan DC digunakan sebagai sumber *input* konverter. Sumber DC variable dirangkai seri sehingga mampu menghasilkan tegangan maksimal 60 volt dengan arus maksimal 5 ampere. Tegangan masukan dari konverter sebesar 36 volt. Beban yang digunakan merupakan resistor yang disusun secara seri-paralel sehingga menghasilkan resistansi sebesar 684.5 ohm dengan daya sebesar $P = 50$ watt. Untuk mengamati bentuk gelombang tegangan dan arus pada rangkaian digunakan osiloskop yang tersedia di laboratorium.



Gambar 4.1 Alat pengujian HVGBC

4.2 Pengujian Sinyal PWM

Pengujian sinyal PWM dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang PWM apakah sesuai dengan desain dan simulasi. Pengujian dilakukan dengan mengamati bentuk gelombang tegangan penyalakan MOSFET pada sisi *Gate-Source* (V_{GS}), sisi *Drain-Source* (V_{DS}) dan arus sisi *Drain-Source* (I_{DS}). Frekuensi *switching* yang digunakan sebesar 50 KHz. Gambar 4.2 menunjukkan bentuk gelombang pensaklaran PWM yang diambil pada sisi *Gate-Source* (V_{GS}), sisi *Drain-Source* (V_{DS}) dan arus sisi *Drain-Source* (I_{DS}).



Gambar 4.2 Bentuk gelombang pensaklaran MOSFET

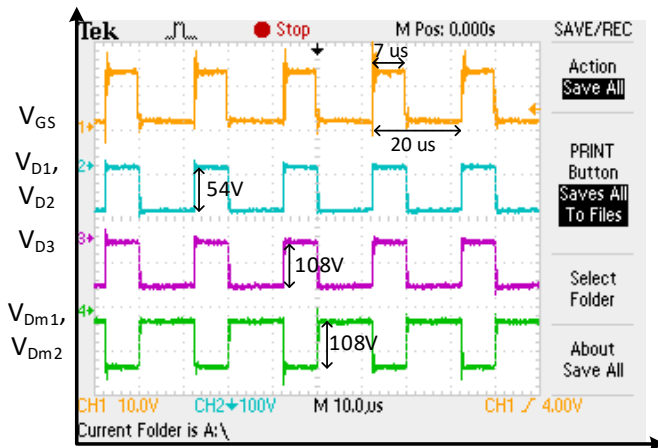
Gambar 4.2 diatas menunjukkan tegangan pada bagian *gate-source* (V_{GS}), *drain-source* (V_{DS}) dan arus pada bagian *drain-source* (I_{DS}). Bentuk gelombang diatas sudah bekerja sesuai dengan perancangan dan simulasi. Saat tegangan V_{GS} aktif maka tegangan V_{DS} bernilai nol. Pada kondisi ini saklar dalam posisi konduksi sehingga mengalir arus I_{DS} pada bagian *drain-source*. Saat tegangan V_{GS} bernilai nol, kondisi saklar terbuka sehingga akan timbul tegangan V_{DS} . Dalam kondisi ini tidak ada arus I_{DS} yang mengalir pada saklar.

Frekuensi yang terbentuk pada implementasi sebesar 50 kHz. Nilai ini sudah sangat mendekati dengan frekuensi desain yaitu sebesar 50 kHz atau sebanding dengan nilai periode sebesar 20 us. *Duty cycle* diatur pada nilai sebesar 35%. Jika dirubah dalam bentuk periode waktu

maka saklar ini akan bekerja (*ON*) selama 7 μs dan saklar akan terbuka (*OFF*) selama 13 μs . Nilai amplitudo V_{GS} tergantung dari besarnya tegangan supply yang disupply ke *driver* MOSFET. Pada implementasi rangkaian, tegangan yang disupply pada *driver* MOSFET sebesar 12 volt sehingga nilai amplitudo tegangan V_{GS} bernilai 12 volt. Berdasarkan persamaan 3.3 secara teori nilai amplitudo tegangan V_{DS} diperoleh nilai sebesar 110.5 V. Sedangkan pada implementasi nilai amplitudo tegangan V_{DS} yaitu sebesar 108 V. Berdasarkan data gelombang hasil implementasi dapat disimpulkan bahwa secara karakteristik MOSFET telah bekerja sesuai desain yang dikerjakan dan nilai tegangan V_{DS} pada implementasi mendekati nilai V_{DS} hasil desain.

4.3 Pengujian Sinyal Pensaklaran pada Dioda

Pada implementasi rangkaian HVGBC digunakan 5 dioda yaitu D_1 , D_2 , D_3 , D_{m1} dan D_{m2} . Pengujian pensaklaran pada dioda dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang tegangan pada dioda apakah sesuai dengan simulasi atau tidak. Dioda akan beroperasi seperti saklar dengan frekuensi pensaklaran sebesar 50 kHz. Berdasarkan hasil simulasi, nilai dan bentuk gelombang $D_1=D_2$ dan $D_{m1}=D_{m2}$.



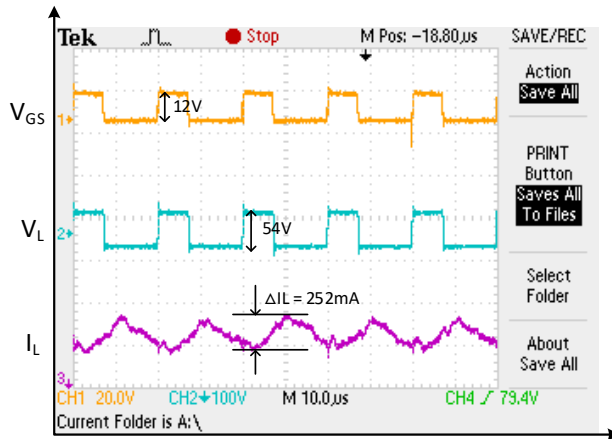
Gambar 4.3 Bentuk sinyal pensaklaran pada dioda D_1 , D_2 , D_{m1} , D_{m2} dan D_3

Gambar 4.3 diatas menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada dioda D_1 , D_2 , D_{m1} , D_{m2} dan D_3 yang dibandingkan dengan tegangan pada MOSFET pada sisi *gate-source* (V_{GS}). Pada saat saklar dalam keadaan *ON* maka V_{GS} akan aktif. Pada saat saklar *ON*, dioda D_1 , D_2 dan dioda D_3 dalam kondisi *forward biased*. Sedangkan dioda D_{m1} dan D_{m2} dalam kondisi *reverse biased*. Karena dalam keadaan *reverse biased*, maka nilai tegangan dioda D_{m1} dan D_{m2} dapat diukur sebesar 108V. Pada saat saklar dalam keadaan *OFF*, dioda D_1 , D_2 dan D_3 dalam keadaan *reverse biased* sedangkan dioda D_{m1} dan D_{m2} dalam keadaan *forward biased*. Nilai dioda D_1 , D_2 dan D_3 dapat diukur sebesar 54 V, 54 V dan 108 V.

Berdasarkan data hasil pengujian yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa karakteristik bentuk gelombang dioda hasil implementasi sudah sesuai dengan karakteristik dioda hasil simulasi. Namun masih terdapat perbedaan nilai tegangan dioda hasil implementasi dengan hasil simulasi. Hal ini disebabkan karena terdapat perbedaan nilai parameter komponen yang digunakan antara simulasi dengan implementasi dan komponen-komponen yang digunakan dalam keadaan aktualnya tidak berada pada kondisi ideal. Sehingga terjadi perbedaan nilai tegangan pada hasil implementasi rangkaian.

4.4 Pengujian Arus dan Tegangan pada Induktor

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kesesuaian karakteristik tegangan dan arus induktor hasil implementasi dengan hasil simulasi saat diberi tegangan *input* 36 volt dengan *duty cycle* sebesar 35%. Gambar 4.4 menunjukan bentuk gelombang hasil pengujian induktor. Dari hasil pengujian diketahui bahwa pada saat saklar *ON* maka tegangan induktor bernilai positif, induktor mengalami proses pengisian muatan sehingga arus induktor naik. Pada saat saklar *OFF* maka tegangan induktor bernilai negatif, induktor mengalami proses pengosongan muatan sehingga arus induktor mengalami penurunan. Gambar 4.4 menunjukan data hasil pengujian implementasi rangkaian yaitu menunjukan gelombang tegangan MOSFET pada sisi *Drain-Source* (V_{DS}), tegangan induktor L_1 (V_{L1}) dan arus induktor L_1 (I_{L1}) pada saat diberi tegangan masukan sebesar 36 volt dengan *duty cycle* sebesar 35%.



Gambar 4.4 Bentuk gelombang tegangan dan arus induktor

Berdasarkan data gelombang yang diperoleh, dapat dianalisis bahwa pada saat V_{GS} aktif atau saklar dalam keadaan tertutup, nilai tegangan induktor L_1 bernilai positif dan arus pada induktor L_1 mengalami proses pengisian atau charging. Hal ini ditunjukkan pada bentuk gelombang arus induktor L_1 (I_{L1}) yang mengalami peningkatan selama periode ini. Sedangkan pada saat V_{GS} tidak aktif atau saklar dalam keadaan terbuka, nilai tegangan induktor L_1 bernilai negatif dan arus induktor L_1 mengalami proses pengosongan atau discharging. Hal ini diketahui dari bentuk gelombang induktor L_1 yang mengalami penurunan selama periode ini. Proses peningkatan dan penurunan arus induktor inilah yang disebut sebagai ripple arus induktor.

Besarnya nilai tegangan MOSFET pada sisi Gate-Source (V_{GS}) sesuai dengan nilai tegangan yang disuplai pada driver MOSFET yaitu 12 Volt. Nilai tegangan induktor pada saat saklar tertutup dan terbuka sebesar 32 volt dan -22 volt. Berdasarkan hasil simulasi nilai tegangan induktor pada saat saklar *on* dan *off* sebesar 36V dan -19.26 V. Nilai ripple arus induktor berdasarkan desain diatur sebesar 2.5%.

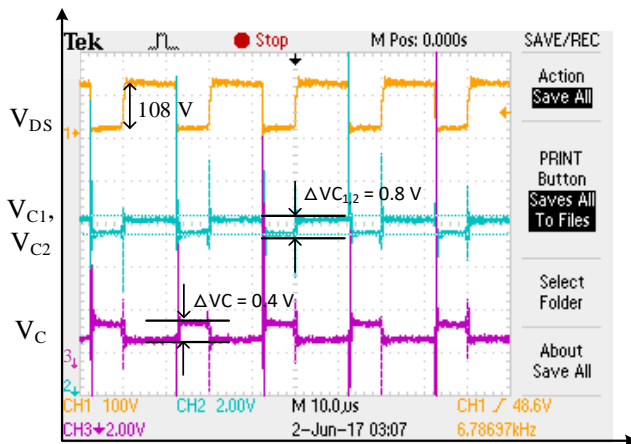
Berdasarkan hasil simulasi didapatkan nilai arus induktor pada puncak tertinggi sebesar 0.85A dan pada lembah terendah sebesar 0.82A dengan nilai rata-rata 0.84A didapatkan presentase nilai *ripple* arus induktor sebesar 3.6%. Namun berdasarkan hasil implementasi, nilai arus induktor pada puncak tertinggi sebesar 1.22A dan pada lembah terendah

sebesar 0.97A dengan rata-rata sebesar 1.09A didapatkan presentase nilai *ripple* arus induktor sebesar 22.8%. Selisih perbedaan nilai maksimal dan minimal inilah yang dikatakan sebagai *ripple* arus induktor. Presentase nilai *ripple* arus induktor didapatkan dengan membandingkan nilai *ripple* arus induktor dengan arus rata-rata induktor.

Berdasarkan data yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa secara karakteristik bentuk gelombang arus dan tegangan induktor sudah sesuai. Besar nilai dan tegangan arus hasil implementasi sudah mendekati dengan hasil yang diperoleh dari proses simulasi. Adanya perbedaan nilai tegangan dan arus induktor hasil simulasi dengan implementasi disebabkan karena adanya perbedaan nilai komponen yang digunakan saat implementasi, ketidak idealan komponen, desain induktor yang kurang sempurna dan pengaruh komponen yang tidak tahan dengan frekuensi tinggi.

4.5 Pengujian Tegangan Kapasitor

Pengujian tegangan kapasitor bertujuan untuk mengetahui kesesuaian bentuk gelombang tegangan kapasitor antara hasil implementasi dengan hasil simulasi. Pengujian dilakukan pada saat tegangan *input* sebesar 36 volt dengan *duty cycle* sebesar 35%. Dari hasil implementasi didapatkan hasil bentuk gelombang sesuai gambar 4.5.



Gambar 4.5 Tegangan kapasitor C, C_1 dan C_2

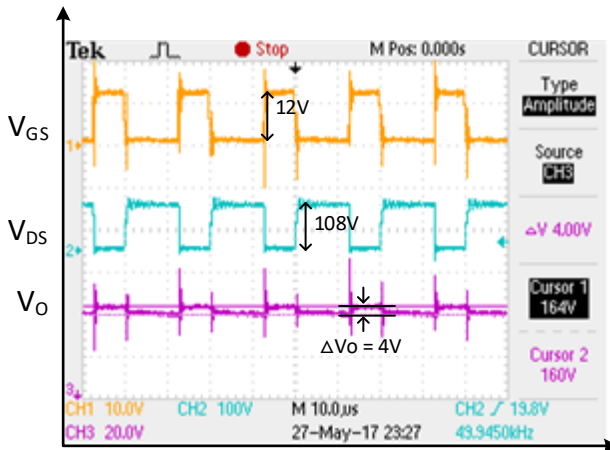
Gambar 4.5 menunjukkan gelombang tegangan kapasitor hasil implementasi. Tegangan kapasitor yang diukur adalah tegangan kapasitor C, C₁ dan C₂. Dari hasil simulasi, tegangan kapasitor C₁ dan C₂ adalah sama. Sehingga yang diukur cukup salah satu yaitu kapasitor C₁. Berdasarkan gambar diatas diketahui nilai tegangan untuk masing-masing kapasitor, yaitu $V_C = 32 \text{ V}$, V_{C1} dan $V_{C2} = 66.8 \text{ V}$.

Nilai tegangan kapasitor diatas sudah mendekati dengan nilai tegangan kapasitor hasil simulasi. Hasil simulasi menunjukkan tegangan kapasitor C sebesar 35.97 V, tegangan kapasitor C₁ dan C₂ sebesar 74.48 V. Nilai ini sudah mendekati dengan hasil perhitungan yaitu $V_C = 36 \text{ V}$, V_{C1} dan $V_{C2} = 74.5 \text{ V}$. Adanya perbedaan nilai tegangan kapasitor antara hasil simulasi dengan implementasi disebabkan karena adanya efek parasite komponen dan adanya perbedaan nilai parameter komponen yang digunakan. Kapasitor yang digunakan dalam simulasi merupakan komponen ideal sedangkan kapasitor yang digunakan dalam implementasi merupakan komponen yang tidak ideal. Hal ini yang membuat terjadinya perbedaan hasil pengukuran tegangan kapasitor.

4.6 Pengujian Tegangan Keluaran

Pengujian tegangan keluaran rangkaian konverter bertujuan untuk mengetahui apakah konverter hasil implementasi mampu meningkatkan tegangan dari 36 volt menjadi 185 volt sesuai dengan desain yang telah dikerjakan. Berikut merupakan gambar gelombang tegangan MOSFET pada sisi *Gate-Source*, *Drain-Source* dan tegangan keluaran konverter.

Gambar 4.6 dibawah menunjukkan gelombang keluaran hasil implementasi. Berdasarkan data yang diperoleh diketahui bahwa pada saat *duty cycle* sebesar 35%, rangkaian *boost converter* mampu menghasilkan tegangan *output* dengan nilai tegangan tertinggi sebesar 164 volt dan tegangan terendah sebesar 160 volt. Sehingga diperoleh selisih nilai tegangan antara puncak tertinggi dan terendah sebesar 4 volt. Proses peningkatan dan penurunan tegangan keluaran ini disebabkan oleh proses pensaklaran MOSFET yang akan menghasilkan nilai *ripple* tegangan *output* dengan nilai tertentu.



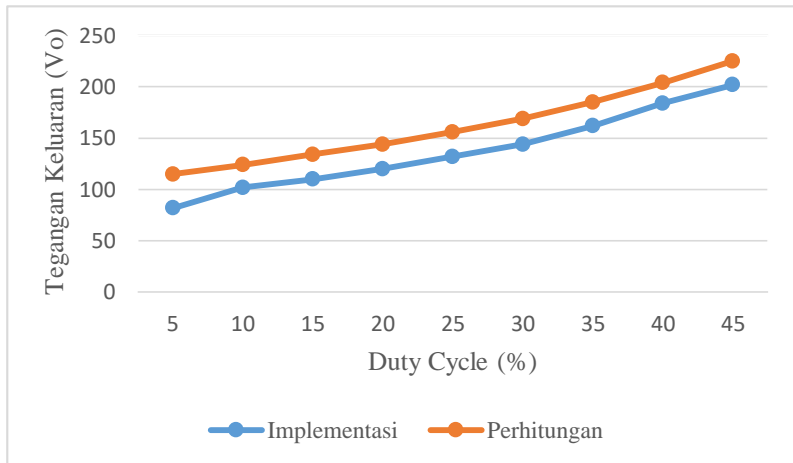
Gambar 4.6 Gelombang tegangan keluaran konverter

Nilai rata-rata tegangan keluaran yang dihasilkan rangkaian boost konverter pada saat *duty cycle* sebesar 35% adalah 162 volt. Dengan membandingkan nilai *ripple* tegangan *output* dengan rata-rata tegangan *output* maka akan didapat presentase besarnya nilai *ripple* tegangan keluaran rangkaian boost konverter. Dari perhitungan diperoleh *ripple* tegangan keluaran sebesar 2.46%. Nilai *ripple* tegangan keluaran ini sudah mendekati dengan nilai *ripple* hasil desain yang diatur sebesar 1%. Adanya perbedaan nilai *ripple* tegangan keluaran antara hasil desain dan implementasi disebabkan karena ketidaksamaan nilai komponen yang digunakan dalam implementasi dan pada simulasi semua komponen dianggap sebagai komponen yang ideal dan tidak memiliki rugi-rugi internal.

4.7 Pengujian Rasio Konversi

Pengujian ini memiliki tujuan untuk mengetahui besarnya penguatan tegangan keluaran yang mampu dihasilkan rangkaian HVGBC. Uji rasio konversi energi merupakan pengujian dengan membandingkan nilai tegangan *output* konverter dengan nilai tegangan *input* konverter. Pengujian ini dilakukan dengan cara merubah nilai *duty cycle* dan menjaga tegangan masukan pada nilai yang konstan. Secara teori semakin besar nilai *duty cycle* yang digunakan maka semakin besar

tegangan *output* yang dihasilkan konverter. Tegangan masukan disetting konstan pada nilai 36 volt. Nilai *duty cycle* dinaikan secara perlahan dari 5% sampai dengan 45%. Beban yang digunakan memiliki nilai resistansi sebesar 685 ohm. Dari implementasi didapatkan data hasil pengujian sebagai berikut:



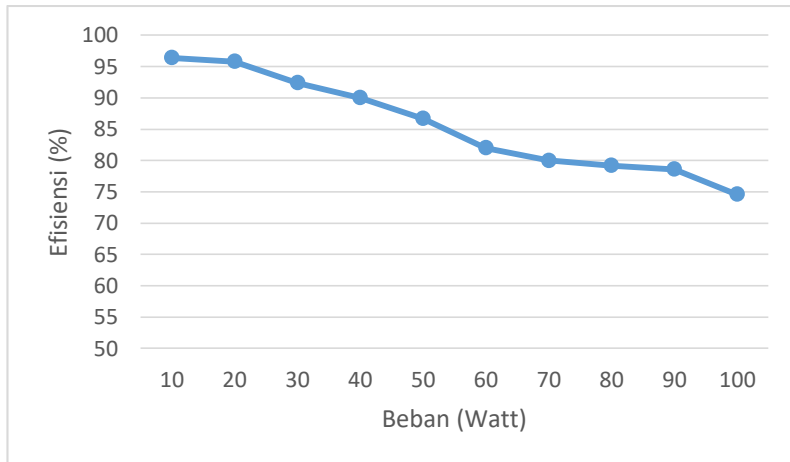
Gambar 4.7 Grafik pengujian rasio konversi

Gambar 4.7 merupakan grafik hasil uji rangkaian konverter yang menunjukkan hasil implementasi antara tegangan keluaran dengan besar *duty cycle* yang digunakan. Grafik tegangan keluaran yang digunakan merupakan tegangan keluaran hasil perhitungan dengan hasil implementasi. Nilai tegangan masukan diatur tetap pada nilai sebesar 36 volt. Dari data hasil pengujian diketahui bahwa semakin besar nilai *duty cycle* yang digunakan maka tegangan keluaran yang dihasilkan akan semakin besar. Terdapat perbedaan nilai hasil tegangan keluaran antara hasil perhitungan dengan hasil implementasi. Hal ini terjadi karena faktor ketidak idealan komponen-komponen yang digunakan saat implementasi. Pada setiap komponen memiliki nilai tahanan dalam. Besarnya tahanan dalam inilah yang menyebabkan terjadinya drop tegangan hasil implementasi. Semakin besar *duty cycle* yang digunakan maka semakin besar arus yang mengalir sehingga semakin besar pula drop tegangan pada rangkaian. Dari data hasil uji yang didapatkan dapat disimpulkan bahwa

nilai tegangan keluaran hasil implementasi sudah mendekati dengan nilai tegangan keluaran hasil simulasi.

4.8 Pengujian Efisiensi

Pengujian efisiensi dilakukan dengan memvariasikan daya *output* rangkaian konverter untuk nilai tegangan masukan sebesar 36 volt. Sedangkan tegangan *output* diatur konstan pada nilai 185 volt. Saat pengujian rangkaian, diukur daya *input* dan daya *output* rangkaian sehingga dapat dihitung tingkat efisiensi dari rangkaian konverter tersebut. Beban rangkaian diatur secara bertahap dari 10 watt hingga 100 watt. Pengujian tingkat efisiensi rangkaian konverter berdasarkan implementasi didapatkan hasil sebagai berikut:



Gambar 4.8 Grafik pengujian efisiensi konverter

Dari grafik yang tertera pada gambar 4.8 diatas dapat diketahui bahwa rangkaian *boost converter* dapat bekerja optimal pada saat dibebani beban dengan daya antara 10 sampai 60 watt. Yang ditunjukan dengan nilai efisiensi yang cukup tinggi yaitu melebihi 80%. Seiring dengan peningkatan daya, efisiensi konverter akan semakin berkurang. Hal ini bisa dijelaskan karena semakin besar daya yang diterapkan, maka arus yang mengalir akan semakin semakin besar. Sehingga rugi-rugi daya dan drop tegangan yang terjadi akan semakin besar.

Beberapa upaya dapat dilakukan dalam rangka meningkatkan tingkat efisiensi rangkaian konverter yaitu dengan memperhatikan jarak antar komponen yang digunakan sehingga tidak menimbulkan efek inferensi medan elektromagnetik yang mempengaruhi komponen satu dengan yang lain. Kemudian memilih komponen dengan spesifikasi yang lebih baik, sehingga memiliki rating yang lebih tinggi dan memiliki sifat *parasitic component* yang lebih kecil. Selain itu perlu diperhatikan cara mengurangi panas yang terjadi saat rangkaian bekerja. Terutama pada komponen semikonduktor seperti MOSFET dan dioda yang digunakan. Hal ini dapat diatasi dengan pemberian heatsink dan pemberian kipas pendingin pada komponen tersebut.

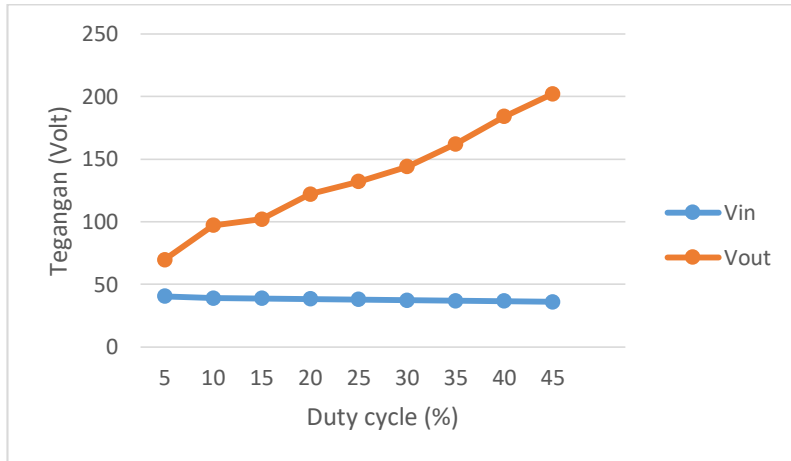
4.9 Pengujian Menggunakan Modul *Fuel cell*

Pengujian rangkaian konverter menggunakan modul *fuel cell* bertujuan untuk mengetahui kemampuan pembangkitan tegangan oleh konverter saat dihubungkan langsung dengan modul *fuel cell*. Modul *fuel cell* yang digunakan merupakan modul *fuel cell* Horizon 1000 yang terdapat di laboratorium konversi energi listrik. Selama pengujian, rangkaian konverter diberikan beban sebesar 50 watt. Peralatan yang digunakan merupakan peralatan uji dalam skala laboratorium. Semua peralatan yang digunakan tersedia di laboratorium konversi energi listrik. Gambar 4.9 dibawah ini menunjukkan perlengkapan yang digunakan selama proses pengujian berlangsung.



Gambar 4.9 Peralatan pengujian konverter menggunakan modul *fuel cell*

Data hasil pengujian menggunakan modul *fuel cell* disajikan dalam bentuk grafik antara *duty cycle*, tegangan masukan konverter dan tegangan keluaran konverter yang tersaji pada gambar 4.10 berikut ini:



Gambar 4.10 Grafik pengujian menggunakan modul *fuel cell*

Berdasarkan data hasil pengujian, diketahui bahwa tegangan keluaran *fuel cell* yang digunakan sebagai tegangan masukan rangkaian konverter mengalami penurunan seiring dengan peningkatan nilai *duty cycle* yang digunakan. Saat *duty cycle* = 0%, diketahui tegangan output *fuel cell* sebesar 43 volt. Namun saat *duty cycle* = 45% tegangan output *fuel cell* mengalami drop tegangan menjadi 36 volt. Ketika *duty cycle* dinaikan (>45%), modul *fuel cell* secara otomatis menjadi OFF. Sesuai dengan nameplate pada bab 3, hal ini terjadi karena pada modul *fuel cell* Horizon 1000 memiliki sistem proteksi diri. Jika tegangan keluaran *fuel cell* kurang dari 36 volt maka *fuel cell* akan mati secara otomatis. Sehingga pada pengujian menggunakan modul *fuel cell* tegangan keluaran maksimum yang dapat dihasilkan rangkaian konverter sebesar 200 volt pada saat *duty cycle* sebesar 45%.

BAB 5

PENUTUP

Pada bab ini akan diuraikan beberapa kesimpulan dan saran dari serangkaian kegiatan penelitian yang dikerjakan.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil simulasi dan pengujian implementasi rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* dengan rangkaian pelipatganda tegangan untuk aplikasi *fuel cell*, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Implementasi HVGBC mampu meningkatkan tegangan 36 V_{DC} menjadi 162 V_{DC}, sehingga nilai penguatan (*gain*) rangkaian sebesar 4.5 kali pada kondisi pembebanan penuh (50 W).
2. Terdapat perbedaan besarnya nilai *ripple* antara hasil desain dan implementasi. Pada desain nilai *ripple* arus masukan sebesar 2.5%. Sedangkan saat implementasi sebesar 22.8%. Pada desain nilai *ripple* tegangan keluaran sebesar 1% sedangkan pada saat implementasi sebesar 2.46%.
3. Efisiensi rata-rata dari implementasi HVGBC adalah 85.57%.
4. Kapasitor filter pada sisi *output* rangkaian dapat menggunakan kapasitor dengan nilai kapasitansi yang besar. Hal ini berguna untuk mengurangi nilai *ripple* tegangan keluaran.

5.2 Saran

Adapun saran pada penelitian ini yang dapat diberikan sebagai referensi untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Memilih komponen dengan spesifikasi lebih baik yang mampu dioperasikan pada tegangan dan frekuensi tinggi.
2. Komponen penyaklaran sebaiknya menggunakan komponen yang memiliki spesifikasi lebih baik dari pada MOSFET, misalnya komponen IGBT. Hal ini bertujuan untuk mengurangi rugi daya akibat penyaklaran.
3. Rangkaian *high voltage gain dc-dc boost converter* dengan rangkaian pelipatganda tegangan selanjutnya dapat digunakan dikembangkan lebih lanjut sehingga bisa digunakan sebagai *input inverter* yang terhubung ke jala-jala.

4. Komponen induktor pada rangkaian *boost converter* dapat diganti dengan induktor terkopel untuk kinerja yang lebih baik dan menghemat biaya pembuatan.
5. Pemilihan kapasitor *snubber* dengan nilai dan rating yang lebih baik untuk mengatasi *spike* tegangan MOSFET pada sisi *drain-source*.
6. Menggunakan metode manajemen panas yang lebih baik, sehingga dapat mengurangi drop tegangan yang terjadi dan meningkatkan efisiensi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arya Ramachandran and Sreethumol M V, “High Gain DC-DC Boost Converter with Better Voltage Regulation,” dalam *2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, 2015.
- [2] P. Poovarasan, M. Saraswathi and R.Nandhini, “Analysis of High Voltage gain DC-DC Boost Converter for Renewable Energy Applications,” dalam *International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, Melmaruvathur, 2015.
- [3] Antonio Alisson Alencar Freitas, Fernando Lessa Tofoil, Edilson Mineiro Sa Junior, Sergio Daher and Fernando Luiz Marcelo Antunes, “High-voltage gain dc–dc boost converter with coupled inductors for photovoltaic systems”, *IET Power Electronics*, vol.8, p. 1885-1892, 2015.
- [4] Watson, R., and Lee, F.C., 1996. “A soft-switched, full-bridge *boost converter* employing an active-clamp circuit”, *27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2:1948-1954.
- [5] M. P. Prof. Ir. Mochammad Ashari, Sistem Konverter DC, Surabaya: ITS Press , 2012.
- [6] Rong-Jong Wai, Li-Wei Liu and Rou-Young Duan, “High-Efficiency Voltage-Clamped DC–DC Converter With Reduced Reverse-Recovery Current and Switch-Voltage Stress”, dalam *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Taiwan, 2006.
- [7] Mahajan Sagar Bhaskar Ranjana, Nandyala Sreeramula Reddy and Repalle Kusala Pavan Kumar, “A Novel Non-Isolated Switched Inductor Floating Output DC-DC Multilevel Boost Converter For Fuelcell Applications”, dalam *2014 IEEE Students’ Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, Tamil Nadu, 2014.
- [8] Guilhermer H.F. Fuzato, Cassius R. Aguiar, Klebber de A. Ottoboni, Renan F. Bastos and Ricardo Q. Machado, “Voltage gain analysis of the interleaved boost with voltage multiplier converter used as electronic interface for fuel cells systems”, *IET Power Electronics*, vol. 9, p.1842-1851, 2016.

- [9] Mahajan Sagar Bhaskar Ranjana, Nandyala Sreeramula Reddy and Repalle Kusala Pavan Kumar, "A Novel High Gain Floating Output DC-DC Multilevel Boost Converter for Fuelcell Applications", dalam *2014 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies [ICCPCT]*, Tamil Nadu, 2014.
- [10] Musbahu Muhammad, Matthew Armstrong and Mohammed A. Elgendy, "A Nonisolated Interleaved Boost Converter for High-Voltage Gain Applications", *IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics* vol. 04, no. 2, 2016.
- [11] B. Axelrod, Y. Berkovich, A.Senkman and G. Golan, "Diode–capacitor voltage multipliers combined with boost-converters: topologies and characteristics", *IET Power Electronics*, vol. 5, p. 873-884, 2012.
- [12] TDK., "Ferrites and Accessories E65/32/27"., EPCOS AG, June 2013.
- [13] TDK., "Ferrites and Accessories SIFERRIT material N27".,EPCOS AG, September 2006.

LAMPIRAN

1. Tabel Kawat Tembaga AWG

AWG	Diameter (mm)	Luas Area (mm ²)	Arus (A)
1	7,350	42,4000	119
2	6,540	33,6000	94
3	5,190	21,2000	75
4	5,190	21,2000	60
5	4,620	16,8000	47
6	4,110	13,3000	37
7	3,670	10,6000	30
8	3,260	8,3500	24
9	2,910	6,6200	19
10	2,590	5,2700	15
11	2,300	4,1500	12
12	2,050	3,3100	9,3
13	1,830	2,6300	7,4
14	1,630	2,6300	5,9
15	1,450	1,650	4,7
16	1,290	1,3100	3,7
17	1,150	1,0400	2,9
18	1,024	0,8230	2,3
19	0,912	0,6530	1,8
20	0,812	0,5190	1,5
21	0,723	0,4120	1,2
22	0,644	0,3250	0,92
23	0,573	0,2590	0,729
24	0,511	0,4120	0,577
25	0,455	0,1630	0,457
26	0,405	0,1280	0,361
27	0,361	0,1020	0,288
28	0,321	0,0804	0,226
29	0,286	0,0646	0,182
30	0,255	0,0503	0,142

2. Listing Program Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3f,16,2);
void setup() {

    lcd.init();           // initialize the lcd
    lcd.init();

    Serial.begin(9600);
    lcd.backlight();

    pinMode(9, OUTPUT);

}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    TCCR1A = _BV(COM1A1);
    TCCR1B = _BV(WGM13) | _BV(CS10);
    ICR1 = 320;
    Duty_Var = analogRead(A0);
    OCR1A = (Duty_Var/1023)*ICR1;

    int f = 50;
    int duty = (Duty_Var/1023)*100;

    lcd.setCursor(3,0);
```

```
lcd.print("TA IRAWAN");
```

```
lcd.setCursor(1,1);  
lcd.print("f=");  
lcd.setCursor(3,1);  
lcd.print(f);  
lcd.setCursor(5,1);  
lcd.print("kHz");  
lcd.setCursor(10,1);  
lcd.print("D=");  
lcd.setCursor(12,1);  
if (duty < 10) lcd.print (" ");Spasi 1  
lcd.print(duty);  
lcd.setCursor(14,1);  
lcd.print("% ");
```

```
}
```

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

RIWAYAT HIDUP



Penulis buku penelitian berjudul ***“High Voltage Gain DC-DC Boost Converter Untuk Aplikasi Fuel Cell”*** bernama Irawan. Penulis yang akrab disapa Irawan ini, lahir di Klaten pada 07 Agustus 1995. Penulis hidup sederhana di desa Pengkol 02/08, Dengkeng, Wedi, Klaten bersama dengan kedua orang tua dan 3 saudara. Penulis tumbuh besar di Klaten hingga meneruskan kuliah dan merantau di Surabaya. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SD Negeri 1 Dengkeng pada tahun 2008, pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 2 Wedi pada tahun 2011, pendidikan tingkat lanjut di SMA Negeri 1 Klaten pada tahun 2013 dan pendidikan tingkat tinggi di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2017. Selama masa perkuliahan, penulis aktif di beberapa organisasi dan kepanitiaan, lomba karya ilmiah dan aktif sebagai Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik. Penulis mempunyai motto hidup “Man jadda wa jadda” Barangsiapa bersungguh-sungguh, maka dia akan mendapatkan.

Email : irawan.its@gmail.com
irawan13@mhs.ee.its.ac.id

--Halaman ini sengaja dikosongkan--